

ВИДАВНИЦТВО  
РАНОК

$$F_{\text{ТЯЖ}} = G \frac{m \cdot M}{(R+h)^2}$$



Інтернет-  
підтримка

# ФІЗИКА

$$\vec{v} = \vec{v}_0$$

# 9

За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

КЛАС

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$$



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

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$s = \frac{c \cdot t}{2}$$

## ІНСТРУКЦІЯ З БЕЗПЕКИ ДЛЯ УЧНІВ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЗАНЯТЬ У КАБІНЕТІ ФІЗИКИ

### 1 — Загальні положення

- 1.1. У кабінеті фізики учні повинні суворо дотримуватися правил безпеки та правил внутрішнього розпорядку навчального закладу, установлених норм і режимів праці та відпочинку.
- 1.2. Учні можуть перебувати в кабінеті фізики тільки у присутності вчителя або лаборанта.
- 1.3. Про кожний нещасний випадок, що трапився під час проведення занять із фізики, слід негайно повідомити вчителя.
- 1.4. Про вихід із ладу або несправність обладнання слід негайно повідомити вчителя.

### 2 — Вимоги безпеки в екстремальних ситуаціях

- 2.1. У разі травмування, нездужання тощо негайно повідомте про це вчителя.
- 2.2. У разі виникнення загоряння, пожежі тощо негайно повідомте про це вчителя.
- 2.3. У випадку евакуації чітко виконуйте розпорядження вчителя.

### 3 — Вимоги безпеки перед початком роботи

- 3.1. Чітко з'ясуйте порядок і правила безпечного проведення досліду.
- 3.2. Звільніть робоче місце від усіх не потрібних для роботи предметів і матеріалів.
- 3.3. Перевірте наявність і надійність з'єднувальних провідників, приладів та інших предметів, необхідних для виконання завдання.
- 3.4. Починайте виконувати роботу тільки з дозволу вчителя.
- 3.5. Виконуйте тільки ті завдання, які передбачені в роботі або доручені вчителем.

### 4 — Вимоги безпеки під час роботи

- 4.1. Працюйте лише на своєму робочому місці.
- 4.2. Будьте уважні й дисципліновані, точно виконуйте вказівки вчителя.
- 4.3. Розміщуйте прилади, матеріали, обладнання на своєму робочому місці так, щоб запобігти їх падінню або перекиданню.
- 4.4. Під час проведення дослідів не допускайте граничних навантажень вимірювальних приладів.
- 4.5. Стежте за справністю всіх кріплень у приладах і пристроях. Не торкайтесь обертових частин машин і не нахиляйтеся над ними.
- 4.6. Для складання експериментальних установок користуйтеся провідниками з клемми й запобіжними чохлами з міцною ізоляцією та без видимих пошкоджень.

- 4.7. Без дозволу вчителя не вмикайте електричне обладнання; самостійно не усувайте несправності електромережі й електрообладнання.
- 4.8. Складаючи електричне коло, уникайте перетину провідників; заборонено користуватися провідниками зі спрацьованою ізоляцією та вимикачами відкритого типу.
- 4.9. Джерело струму вмикайте в електричне коло в останню чергу. Складене коло вмикайте тільки після перевірки і з дозволу вчителя. Наявність напруги в колі можна перевіряти тільки спеціальними приладами або індикаторами напруги.
- 4.10. Не торкайтесь елементів кола, що не мають ізоляції й перебувають під напругою. Не виконуйте повторно з'єднання в колах і не замінюйте запобіжники до вимикання джерела електроживлення.
- 4.11. Користуйтеся інструментами із заізольованими ручками.
- 4.12. Не залишайте робоче місце без дозволу вчителя.
- 4.13. Виявивши несправність в електричному обладнанні, що перебуває під напругою, негайно повідомте про це вчителя.
- 4.14. Для приєднання споживачів до мережі користуйтеся штепсельними з'єднаннями.

### 5 — Вимоги безпеки після закінчення роботи

- 5.1. Після закінчення роботи обов'язково приберіть робоче місце. Прибирання виконуйте тільки з дозволу вчителя.
- 5.2. Електричне коло розбирайте тільки після вимкнення джерела електроживлення.

## ЩО НЕОБХІДНО ЗНАТИ

### — Про фізичне явище

- 1) зовнішні ознаки явища, умови, за яких воно відбувається;
- 2) зв'язок даного явища з іншими;
- 3) фізичні величини, які характеризують явище;
- 4) можливості практичного використання, способи запобігання шкідливим наслідкам явища

### — Про прилад або пристрій

- 1) призначення;
- 2) будова;
- 3) принцип дії;
- 4) сфера застосування і правила користування;
- 5) переваги й недоліки

### — Про фізичний закон

- 1) формулювання, зв'язок між якими явищами встановлює даний закон;
- 2) математичний вираз;
- 3) досліди, що привели до встановлення закону або підтверджують його справедливність;
- 4) межі застосування

### — Про фізичну величину

- 1) символ для позначення;
- 2) властивість, яку характеризує дана фізична величина;
- 3) означення (дефініція);
- 4) формула, покладена в основу означення, зв'язок з іншими фізичними величинами;
- 5) одиниці;
- 6) способи вимірювання

# ФІЗИКА

# 9

Підручник для 9 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів  
За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

Рекомендовано  
Міністерством освіти і науки України

Харків  
Видавництво «Ранок»  
2017

УДК [37.016:53](075.3)

Ф50

Підручник створено авторським колективом у складі:  
В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 20.03.2017 № 417)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Експерти, які здійснили експертизу підручника під час проведення конкурсного відбору проектів підручників для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів і зробили висновок про доцільність надання підручнику грифа «Рекомендовано Міністерством освіти і науки України»:

*С. М. Совгира*, учитель Черкаської спеціалізованої школи I–III ступенів № 33 імені Василя Симоненка Черкаської міської ради Черкаської області, вчитель-методист;  
*Т. М. Левицька*, завідувач міським методичним кабінетом Управління освіти Ніжинської міської ради Чернігівської області, вчитель-методист;  
*А. В. Королишин*, доцент кафедри фізики металів фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка, кандидат фізико-математичних наук

Рецензент:

*І. М. Гельфгат*, учитель фізики комунального закладу «Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учитель-методист, Заслужений учитель України, кандидат фізико-математичних наук

Автори й видавництво висловлюють щирю подяку:  
*М. М. Кірюхіну*, президенту Співки наукових і інженерних об'єднань України, кандидату фізико-математичних наук;

*І. Ю. Ненашеву*, учителю-методисту, Заслуженому вчителю України;  
*І. В. Хован*, учителю фізики НВК «Домінанта», кандидату педагогічних наук, за слушні зауваження й конструктивні поради;

*І. С. Чернецькому*, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук, за створення відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

*Методичний апарат підручника успішно пройшов експериментальну перевірку в Національному центрі «Мала академія наук України»*

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

**Ф50 Фізика** : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закл. / [В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Харків : Вид-во «Ранок», 2017. — 272 с. : іл., фот.

ISBN 978-617-09-3356-0

УДК [37.016:53](075.3)



**Інтернет-підтримка**  
Електронні матеріали  
до підручника розміщено на сайті  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О., 2017

© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2017

© Хлистун В. В., Солонський С. П., фотографії, 2017

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2017

ISBN 978-617-09-3356-0

## Дорогі друзі!

Цього навчального року ви продовжите свою подорож світом фізики. Як і раніше, ви будете спостерігати явища природи, проводити справжні наукові експерименти й на кожному уроці робити власні маленькі відкриття.

Жодна справжня подорож не буває легкою, але ж скільки нового ви дізнаєтеся про світ навколо! А підручник, який ви тримаєте в руках, стане для вас надійним помічником.

Будьте уважними й наполегливими, вивчаючи зміст кожного параграфа, і тоді ви зможете зрозуміти суть викладеного матеріалу та застосувати набуті знання в повсякденному житті.

Зверніть увагу на те, що параграфи завершуються рубриками: *«Підбиваємо підсумки»*, *«Контрольні запитання»*, *«Вправа»*. Для чого вони потрібні і як із ними краще працювати?

У рубриці *«Підбиваємо підсумки»* подано відомості про основні поняття та явища, з якими ви ознайомилися в параграфі. Отже, ви маєте можливість іще раз звернути увагу на головне.

*«Контрольні запитання»* допоможуть з'ясувати, чи зрозуміли ви вивчений матеріал. Якщо ви зможете відповісти на кожне запитання, то все гаразд, якщо ж ні, знову зверніться до тексту параграфа.

Рубрика *«Вправа»* зробить вашу подорож у дивовижний світ фізики ще цікавішою, адже ви зможете застосувати набуті знання на практиці. Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які слід виявити кмітливість і наполегливість. Номер кожного завдання має свій колір (у порядку підвищення складності: синій, зелений, оранжевий, червоний, фіолетовий).

Серед завдань є такі, що слугують для повторення матеріалу, який ви вже вивчали в курсах природознавства, математики або на попередніх уроках фізики.

Зверніть увагу на те, що в підручнику є матеріал, обмежений позначками (\*), — він призначений для тих, хто прагне знати більше.

Чимало цікавого на вас очікує на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання» ([interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)). Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання та лабораторні роботи*. Обов'язково виконуйте їх — і ви будете краще розуміти й любити фізику. Радимо опрацьовувати *завдання «із зірочкою»*, завдяки яким ви навчитеся подавати результати експериментів так, як це роблять справжні вчені.

Матеріали, запропоновані наприкінці кожного розділу в рубриках «Підбиваємо підсумки розділу» і «Завдання для самоперевірки», допоможуть систематизувати отримані знання, будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Для тих, хто хоче більше дізнатися про розвиток фізичної науки й техніки в Україні та світі, знайдеться чимало цікавого й корисного в рубриках «Фізика і техніка в Україні» та «Енциклопедична сторінка».

Зверніть увагу на те, що в підручнику використано позначки, які допоможуть вам орієнтуватися в поданому матеріалі:



Підбиваємо підсумки



Завдання на повторення



Контрольні запитання



Експериментальне завдання



Вправа



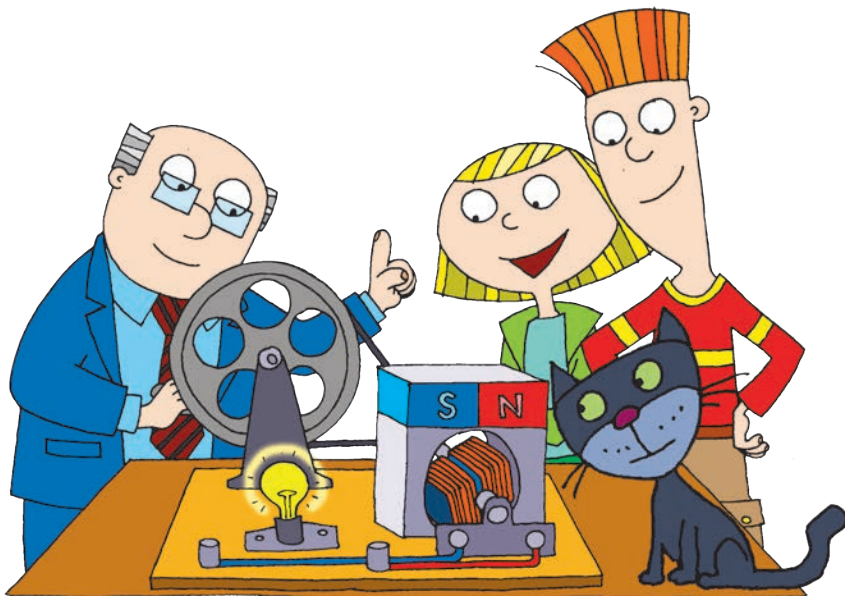
Інтернет-підтримка

*Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!*

# РОЗДІЛ I

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ

- Ви знаєте, що не заблукаєте в лісі, якщо маєте компас, а тепер дізнаєтесь, чи допоможе компас зорієнтуватися на льодових просторах Арктики й Антарктики
- Ви спостерігали, як магніт притягує залізні скріпки, а тепер зможете пояснити, чому він не притягує мідні монетки
- Ви вмієте вимірювати силу струму, а тепер дізнаєтесь про принцип дії амперметра
- Ви постійно користуєтесь електрикою, а тепер дізнаєтесь, як працює генератор електричної енергії



## i

§ 1. МАГНІТНІ ЯВИЩА. ДОСЛІД ЕРСТЕДА.  
МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Ще в глибоку давнину було помічено здатність деяких залізних руд притягувати до себе залізні тіла. Давні греки називали шматки цих руд магнітними каменями, ймовірно, за назвою міста Магнесія, звідки привозили таку руду. Зараз їх називають *природними магнітами*. Існують також *штучні магніти*. Сьогодні ви ознайомитеся з деякими властивостями магнітів, дізнаєтесь про те, що магнітна взаємодія здійснюється через магнітне поле, а також про зв'язок магнітних та електричних явищ.



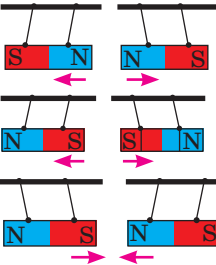
## 1 Вивчаємо властивості постійних магнітів

Ще в 5 класі, вивчаючи курс природознавства, ви дізналися про магнітні явища та виявили, що деякі тіла мають властивість притягувати до себе залізні предмети й самі притягуються до них.

Тіла, які тривалий час зберігають магнітні властивості, називають **постійними магнітами**.

Першу спробу наукового підходу до вивчення магнетизму здійснив у XIII ст. французький фізик *П'єр Пелерен де Марікур* (точні дати життя невідомі) у своєму трактаті «Послання про магніт». Більш системно властивості постійних магнітів дослідив *Вільям Гільберт (1544–1603)* — англійський фізик і лікар, один із засновників науки про електрику. Наведемо основні із цих властивостей.

## Основні властивості постійних магнітів

<p>1. Магнітна дія магніту є різною на різних ділянках його поверхні; ділянки, де магнітна дія виявляється найсильніше, називають <i>полюсами магніту</i>.</p>	<p>2. Магніт має два полюси — <i>північний N</i> і <i>південний S*</i>. Неможливо одержати магніт тільки з одним полюсом.</p>	<p>3. Однойменні полюси магнітів відштовхуються, різнойменні — притягуються.</p>	<p>4. У разі нагрівання постійного магніту до певної температури, яку називають <i>точкою Кюрі</i>, його магнітні властивості зникають.</p>								
 <p>Залізні ошурки</p> <p>Магніт</p>	 <p>Штабовий магніт</p> <p>Підковоподібний магніт</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Метал</th> <th>Точка Кюрі, °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Залізо</td> <td>770</td> </tr> <tr> <td>Кобальт</td> <td>1127</td> </tr> <tr> <td>Нікель</td> <td>354</td> </tr> </tbody> </table>	Метал	Точка Кюрі, °C	Залізо	770	Кобальт	1127	Нікель	354
Метал	Точка Кюрі, °C										
Залізо	770										
Кобальт	1127										
Нікель	354										

\* Від голл. *noord* — північ; *zuiden* (нім. *Süden*) — південь.



## 2 Дізнаємося про дослід Ерстеда і досліди Ампера

Ще вчені Давньої Греції висловлювали припущення, що магнітні й електричні явища пов'язані, проте встановити цей зв'язок учені змогли лише на початку XIX ст.

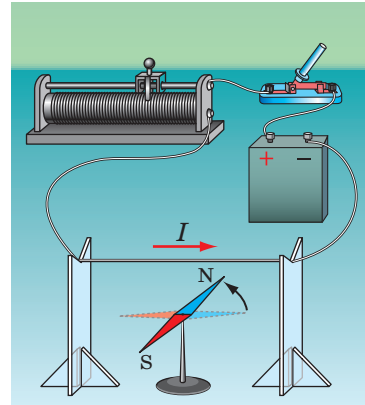
15 лютого 1820 р. данський фізик *Ганс Крістіан Ерстед* (1777–1851) демонстрував студентам дослід із нагріванням провідника електричним струмом. У ході дослідів вчений помітив, що під час проходження струму магнітна стрілка, розташована поблизу провідника, відхиляється від напрямку «північ — південь» і встановлюється перпендикулярно до провідника (рис. 1.1). Як тільки струм припинявся, стрілка поверталася в початкове положення. Так було з'ясовано, що *електричний струм чинить певну магнітну дію*.

Французький математик і фізик *Андре Марі Ампер* (1775–1836) уперше почув про дослід Г. Ерстеда 4 вересня 1820 р. і вже за тиждень продемонстрував взаємодію двох паралельно розташованих провідників зі струмом (рис. 1.2). Ампер також показав, що котушки, в яких проходить електричний струм, поведуться як постійні магніти (рис. 1.3). Аналізуючи результати дослідів, учений дійшов висновку: оскільки провідники є електрично нейтральними (вони незаряджені), їхнє притягання або відштовхування не може пояснюватися дією електричних сил, — «поведінка» провідників є наслідком дії *магнітних сил*.

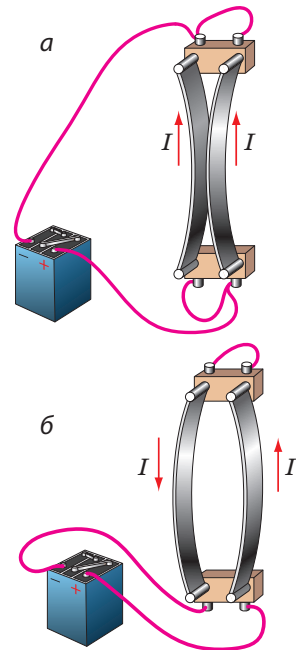
## 3 Даємо означення магнітного поля

У ході вивчення електричних явищ у 8 класі ви дізналися про те, що в просторі навколо зарядженого тіла існує *поле, яке називають електричним*, і що саме через це поле здійснюється електрична взаємодія між зарядженими тілами та частинками.

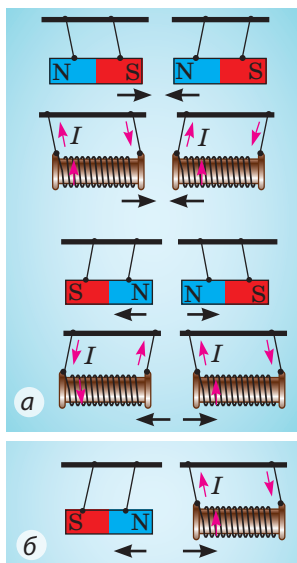
Навколо намагніченого тіла й навколо провідника зі струмом також існує поле — його називають *магнітним*. *Магнітна взаємодія здійснюється з певною швидкістю через магнітне поле* (першим такого висновку дійшов англійський фізик *Майкл Фарадей* (1791–1867)).



**Рис. 1.1.** Схема досліду Ерстеда (Тут і далі наявність символу  $I$  означає, що в провіднику тече струм; стрілка поряд показує напрямок струму.)



**Рис. 1.2.** Схема досліду А. Ампера. Якщо у двох паралельних провідниках течуть струми одного напрямку, провідники притягуються (а); якщо течуть струми протилежних напрямків, провідники відштовхуються (б)



**Рис. 1.3.** Котушки зі струмом поводяться як постійні магніти

Розглянемо, наприклад, взаємодію постійного магніту й котушки зі струмом (рис. 1.3, б). Котушка зі струмом створює магнітне поле. Магнітне поле поширюється в просторі та починає діяти на постійний магніт (намагнічене тіло), — магніт відхиляється. Магніт теж створює власне магнітне поле, яке, у свою чергу, діє на котушку зі струмом, — і котушка теж відхиляється.

Зазначимо, що магнітне поле також існує навколо будь-якої *рухомої* зарядженої частинки та навколо будь-якого *рухомого* зарядженого тіла і діє з певною силою на заряджені тіла та частинки, які *рухаються* в магнітному полі.

*Зверніть увагу:* ми не можемо побачити магнітне поле, проте воно (як і електричне поле) є абсолютно реальним — це форма матерії.

**Магнітне поле** — це форма матерії, яка існує навколо намагнічених тіл, провідників зі струмом, рухомих заряджених тіл і частинок та діє на інші намагнічені тіла, провідники зі струмом, рухомі заряджені тіла й частинки, розташовані в цьому полі.

**?** Поверніться до досліду Ерстеда (див. [рис. 1.1](#)) і досліду Ампера (див. [рис. 1.2](#)) і поясніть, як здійснюється магнітна взаємодія між магнітною стрілкою та провідником зі струмом; між двома провідниками зі струмом.



### Підбиваємо підсумки

Тіла, які тривалий час зберігають свої магнітні властивості, називають постійними магнітами.

Основні властивості постійних магнітів:

- магнітна дія магніту найсильніше виявляється поблизу його полюсів;
- однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні — притягуються; неможливо одержати магніт тільки з одним полюсом;
- у разі нагрівання постійного магніту до певної температури (точка Кюрі) його магнітні властивості зникають.

Магнітна взаємодія здійснюється через магнітне поле. Магнітне поле — це форма матерії, яка існує навколо намагнічених тіл, провідників зі струмом, рухомих заряджених тіл і частинок та діє на розташовані в цьому полі намагнічені тіла, провідники зі струмом, рухомі заряджені тіла й частинки.



### Контрольні запитання

1. Назвіть основні властивості постійних магнітів.
2. Опишіть дослід Г. Ерстеда. У чому суть його відкриття?
3. Опишіть досліди А. Ампера. Що вони доводять?
4. Біля яких об'єктів існує магнітне поле? На які об'єкти воно діє?
5. Дайте означення магнітного поля.



### Вправа № 1

1. Магнітну стрілку розташували біля штабового магніту (рис. 1). Який полюс магніту є південним, а який — північним?
2. Сталеву спицю намагнітили та розділили кусачками спочатку на дві, а потім на чотири частини (рис. 2). Яку властивість магнітів демонструє цей дослід?
3. Чому залізни ошурки, притягнувшись до полюсів магніту, стирчать у різні боки (див. рисунок на с. 6)?
4. Чому звужується струмінь розплавленого металу, коли через нього пропускають струм?
5. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про історію відкриття Г. Ерстеда. Які дослідження він провів, вивчаючи магнітне поле провідника зі струмом? Які результати одержав?

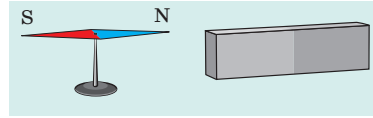


Рис. 1

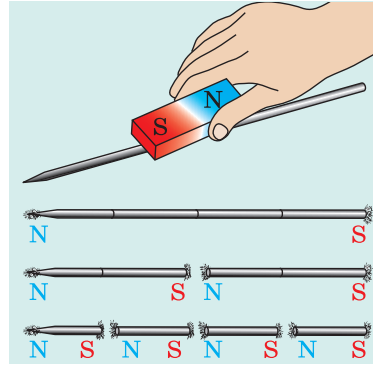


Рис. 2



### Експериментальні завдання

1. Скориставшись двома-трьома постійними магнітами, наприклад паличками магнітного конструктора, експериментально перевірте деякі властивості магнітів.
2. Візьміть кілька голок із нитками. Складіть нитки в один пучок і повільно піднесіть знизу до голок постійний магніт. Поясніть спостережуване явище (рис. 3).

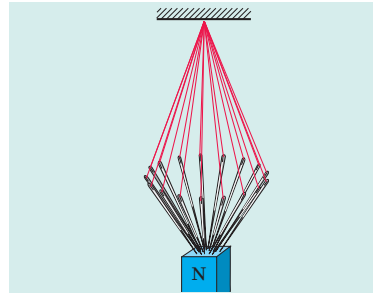


Рис. 3

## Фізика і техніка в Україні

**Інститут магнетизму НАН і МОН України** (Київ) — провідна наукова установа, що проводить дослідження в галузі магнетизму й магнітних матеріалів. Інститут є базовим у підготовці студентів фізико-математичного факультету НТУ «Київський політехнічний інститут», фізичного та радіофізичного факультетів КНУ ім. Тараса Шевченка.

Організатором і першим директором інституту в 1995 р. став видатний український фізик, академік, Герой України *Віктор Григорович Бар'яхтар*, відомий своїми фундаментальними роботами в галузі теоретичної фізики, фізики магнітних явищ, фізики твердого тіла, а також дослідженнями екологічних наслідків Чорнобильської катастрофи. Із 2016 р. інститут очолює член-кореспондент НАПНУ *Юрій Іванович Горобець*. В. Г. Бар'яхтар є почесним директором інституту.

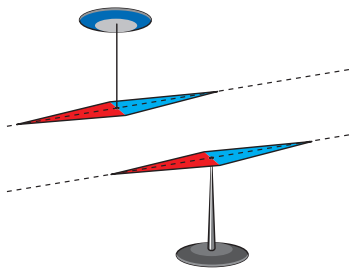
В інституті розроблено матеріали для магнітних сенсорів і реєстраторів інформації, вирощено й синтезовано монокристали, які широко використовують в електроніці. Наукова установа володіє унікальною технологією та обладнанням для наплення тонких наноплівочок.

Науково-дослідницький комплекс скануючої растрової та електронної мікроскопії для наноструктурних досліджень Інституту магнетизму віднесено до наукових об'єктів, які становлять національне надбання.

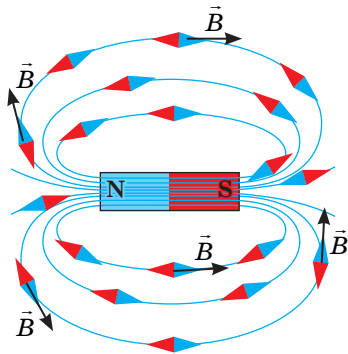


## § 2. ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. ЛІНІЇ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ

Ми не можемо побачити магнітне поле, проте для кращого розуміння магнітних явищ важливо навчитися наочно його зображувати. У цьому нам допоможуть магнітні стрілки. Кожна така стрілка — це маленький постійний магніт, який легко повертається в горизонтальній площині (рис. 2.1). Про те, як графічно зображують магнітне поле та яка фізична величина його характеризує, ви дізнаєтесь із цього параграфа.



**Рис. 2.1.** Магнітна стрілка — це постійний магніт. Пунктирною лінією показано вісь магнітної стрілки



**Рис. 2.2.** У магнітному полі магнітні стрілки орієнтуються певним чином: північний полюс кожної магнітної стрілки вказує напрямком вектора індукції магнітного поля в даній точці

### 1 Вивчаємо силову характеристику магнітного поля

Якщо заряджена частинка рухається в магнітному полі, то поле діятиме на частинку з деякою силою. Значення цієї сили залежить від заряду частинки, напрямку та значення швидкості її руху, а також від того, наскільки сильним є поле.

Силову характеристику магнітного поля є *магнітна індукція*.

**Магнітна індукція (індукція магнітного поля)** — це векторна фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля.

Магнітну індукцію позначають символом  $\vec{B}$ . *Одиниця магнітної індукції в СІ — тесла\**; названа на честь сербського фізика *Ніколи Тесли* (1856–1943):

$$[B] = 1 \text{ Тл.}$$

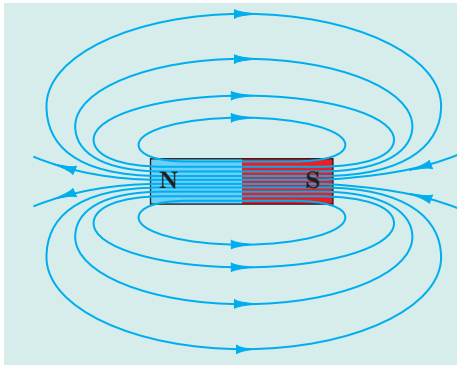
За **напрямок вектора магнітної індукції** в даній точці магнітного поля обрано *напрямок, у якому вказує північний полюс магнітної стрілки, встановленої в даній точці* (рис. 2.2).

*Зверніть увагу!* Напрямок сили, з якою магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки або на провідник зі струмом, або на магнітну стрілку, не збігається з напрямком вектора магнітної індукції.

### 2 Зображуємо магнітне поле

На рис. 2.2 бачимо, що магнітні стрілки орієнтуються в магнітному полі не безладно: їхні осі

\* Як подати 1 Тл через інші одиниці СІ, за якою формулою можна визначити модуль магнітної індукції, як напрямлена сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, ви дізнаєтесь із матеріалу § 4.



*Магнітні лінії:*

- поза магнітом виходять із північного полюса магніту і входять у південний;
- завжди замкнені (магнітне поле — це вихрове поле);
- найщільніше розташовані біля полюсів магніту;
- ніколи не перетинаються

**Рис. 2.3.** Лінії магнітного поля штабового магніту

ніби утворюють лінії, а вектор магнітної індукції в кожній точці напрямлений уздовж дотичної до лінії, яка проходить через цю точку.

Умовні напрямлені лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з лінією, уздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції, називають **лініями магнітної індукції** або **магнітними лініями**.

Саме за допомогою магнітних ліній графічно зображують магнітні поля:

1) за напрямком ліній магнітної індукції в даній точці домовилися брати напрямок вектора магнітної індукції;

2) лінії магнітної індукції зображують щільніше в тих областях поля, де модуль магнітної індукції більше.

Розглянувши графічне зображення магнітного поля штабового магніту, можемо зробити деякі висновки (див. на рис. 2.3). Зазначимо, що ці висновки справджуються для магнітних ліній будь-якого магніту.

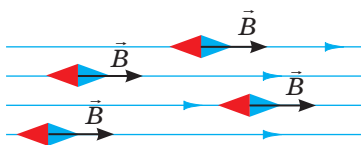
**?** Який напрямок мають магнітні лінії всередині штабового магніту?

Картину магнітних ліній можна відтворити, скориставшись залізними ошурками. Візьмемо підковоподібний магніт, покладемо на нього пластинку з оргскла і через ситечко насипатимемо на пластинку залізнні ошурки. У магнітному полі кожний шматочок заліза намагнітиться й перетвориться на маленьку «магнітну стрілку». Імпровізовані «стрілки» зорієнтуються вздовж магнітних ліній магнітного поля магніту (рис. 2.4).

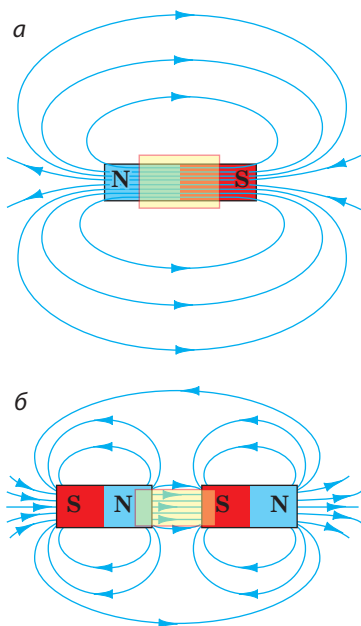
**?** Зобразіть у зошиті картину магнітних ліній магнітного поля підковоподібного магніту. Пам'ятайте про те, що магнітні лінії завжди замкнені.



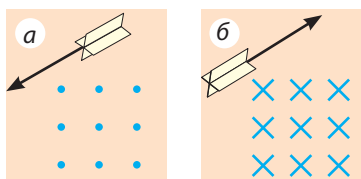
**Рис. 2.4.** Рисунок, утворений ланцюжками залізнних ошурок, відтворює картину ліній магнітної індукції магнітного поля підковоподібного магніту



**Рис. 2.5.** Ділянка, на якій магнітне поле є однорідним



**Рис. 2.6.** Магнітне поле всередині штабового магніту (а) і між двома магнітами, зверненими один до одного різнойменними полюсами (б), можна вважати однорідним



**Рис. 2.7.** Зображення ліній магнітної індукції однорідного магнітного поля, які перпендикулярні до площини рисунка та напрямлені до нас (а); напрямлені від нас (б)

### 3 Розглядаємо однорідне магнітне поле

Магнітне поле в певній частині простору називають **однорідним**, якщо в кожній його точці *вектори магнітної індукції однакові як за модулем, так і за напрямком* (рис. 2.5).

На ділянках, де магнітне поле є однорідним, лінії магнітної індукції паралельні та розташовані на однаковій відстані одна від одної (рис. 2.5, 2.6). У фізиці прийнято магнітні лінії однорідного магнітного поля, які напрямлені до нас, зображати точками (рис. 2.7, а) — ми ніби бачимо «вістря стріл», що летять до нас. Якщо магнітні лінії напрямлені від нас, то їх зображають хрестиками — ми ніби бачимо «пір'я стріл», що летять від нас (рис. 2.7, б).

В більшості випадків ми маємо справу з неоднорідним магнітним полем, — полем, у різних точках якого вектори магнітної індукції мають різні значення та напрямки. Магнітні лінії такого поля викривлені, а їхня щільність є різною.

### 4 Розглядаємо магнітне поле Землі

Із метою вивчення земного магнетизму Вільям Гільберт виготовив постійний магніт у вигляді кулі (модель Землі). Розташувавши на кулі компас, він помітив, що стрілка компаса поводитьсь так само, як на поверхні Землі.

Експерименти дозволили вченому припустити, що *Земля — це величезний магніт, а на півночі нашої планети розташований її південний магнітний полюс*. Подальші дослідження підтвердили гіпотезу В. Гільберта.

На рис. 2.8 зображено картину ліній магнітної індукції магнітного поля Землі.

**?** Уявіть, що ви подорожуєте на Північний полюс, рухаючись точно в тому напрямку, на який вказує стрілка компаса. Чи досягнете ви місця призначення?

*Лінії магнітної індукції магнітного поля Землі не є паралельними її поверхні. Якщо закріпити магнітну стрілку в карданному підвісі, тобто так, щоб вона могла вільно обертатися як навколо горизонтальної, так і навколо вертикальної осей, стрілка встановиться під певним кутом до поверхні Землі (рис. 2.9).*

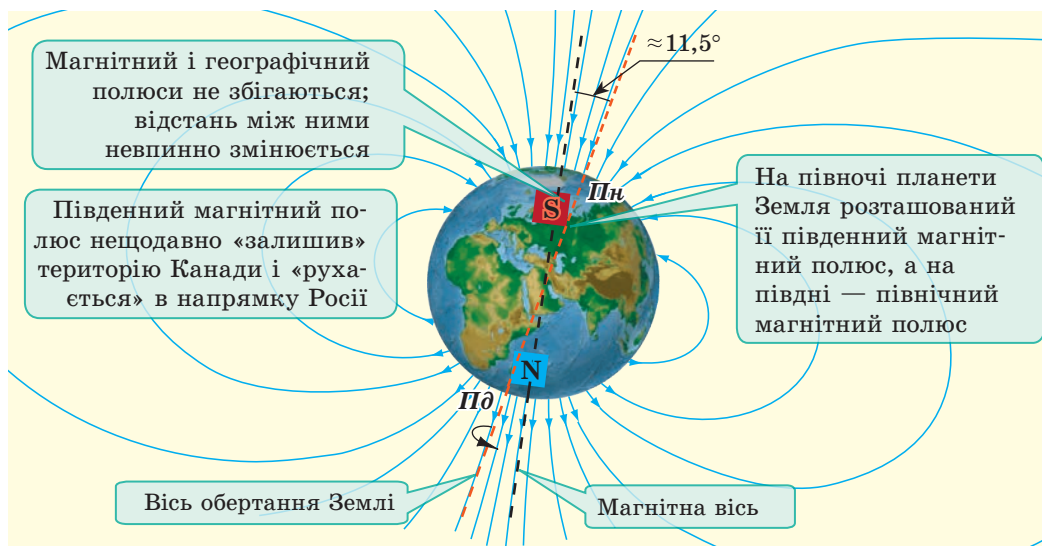


Рис. 2.8. Схема розташування магнітних ліній магнітного поля планети Земля

? Як, на вашу думку, буде розташована магнітна стрілка в пристрої, зображеному на рис. 2.9, біля північного магнітного полюса Землі? біля південного магнітного полюса Землі?

Магнітне поле Землі здавна допомагало орієнтуватися мандрівникам, морякам, військовим і не лише їм. Доведено, що риби, морські ссавці й птахи під час своїх міграцій орієнтуються за магнітним полем Землі. Так само орієнтуються, шукаючи шлях додому, і деякі тварини, наприклад коти.

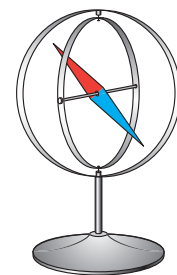
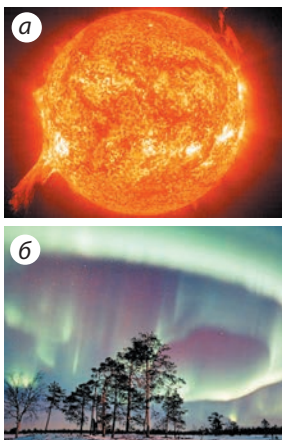


Рис. 2.9. Магнітна стрілка в карданному підвісі

## 5 Дізнаємося про магнітні бурі

Ретельні дослідження показали, що в будь-якій місцевості магнітне поле Землі періодично, щодоби, змінюється. Крім того, спостерігаються невеликі щорічні зміни магнітного поля Землі. Трапляються, однак, і різкі його зміни. Сильні збурення магнітного поля Землі, які охоплюють усю планету і тривають від одного до кількох днів, називають *магнітними бурями*. Здорові люди їх практично не відчувають, а от у тих, хто має серцево-судинні захворювання та захворювання нервової системи, магнітні бурі викликають погіршення самопочуття.

Магнітне поле Землі є своєрідним «щитом», який захищає нашу планету від заряджених частинок, що летять із космосу, переважно від Сонця («сонячний вітер»). Поблизу магнітних полюсів потоки частинок підлітають досить близько до атмосфери Землі. Під час зростання сонячної активності космічні частинки потрапляють у верхні шари атмосфери та йонізують молекули газу — тоді на Землі спостерігаються полярні сьйва (рис. 2.10).



**Рис. 2.10.** Під час підвищення сонячної активності збільшується площа темних плям на Сонці (а), а на Землі відбуваються магнітні бурі та полярні сяйва (б)

### Підбиваємо підсумки

Магнітна індукція  $\vec{B}$  — це векторна фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля. Напрямок вектора магнітної індукції збігається з напрямком, у якому вказує північний полюс магнітної стрілки. Одиниця магнітної індукції в СІ — тесла (Тл).

Умовні напрямлені лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з лінією, уздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції, називають лініями магнітної індукції або магнітними лініями.

Лінії магнітної індукції завжди замкнені, поза магнітом вони виходять із північного полюса магніту та входять у південний, щільніше розташовані в тих областях магнітного поля, де модуль магнітної індукції більше.

Планета Земля має магнітне поле. Поблизу північного географічного полюса Землі розташований її південний магнітний полюс, поблизу південного географічного полюса — північний магнітний полюс.

### Контрольні запитання



1. Дайте означення магнітної індукції.
2. Як напрямлений вектор магнітної індукції?
3. Якою є одиниця магнітної індукції в СІ? На честь кого її назвали?
4. Наведіть означення ліній магнітної індукції.
5. Який напрямок узятو за напрямок магнітних ліній?
6. Від чого залежить щільність розташування магнітних ліній?
7. Яке магнітне поле називають однорідним?
8. Доведіть, що Земля має магнітне поле.
9. Як розташовані магнітні полюси Землі відносно географічних?
10. Що таке магнітні бурі? Як вони впливають на людину?



### Вправа № 2

1. На рис. 1 зображено лінії магнітної індукції на певній ділянці магнітного поля. Для кожного випадку а-в визначте:
  - 1) яке це поле — однорідне чи неоднорідне;
  - 2) напрямок вектора магнітної індукції в точках А і В поля;
  - 3) у якій точці — А чи В — магнітна індукція поля є більшою.
2. Чому сталеві віконні ґрати можуть із часом намагнітитися?
3. На рис. 2 зображено лінії магнітного поля, створеного двома однаковими постійними магнітами, які звернені один до одного однойменними полюсами.

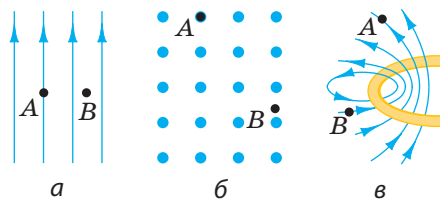


Рис. 1

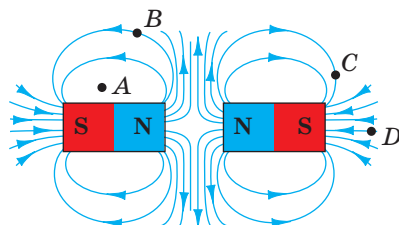


Рис. 2



- 1) Чи існує магнітне поле в точці  $A$ ?
  - 2) Який напрямок має вектор магнітної індукції в точці  $B$ ? у точці  $C$ ?
  - 3) У якій точці —  $A$ ,  $B$  чи  $C$  — магнітна індукція поля є найбільшою?
  - 4) Який напрямок мають вектори магнітної індукції всередині магнітів?
4. Раніше під час експедицій на Північний полюс виникали труднощі щодо визначення напрямку руху, адже поблизу полюса звичайні компаси майже не працювали. Як ви вважаєте, чому?
  5. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, яке значення має магнітне поле для життя на нашій планеті. Що сталося б, якби магнітне поле Землі раптом зникло?
  6. На земній поверхні є області, де магнітна індукція магнітного поля Землі значно більша, ніж у сусідніх районах. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про магнітні аномалії детальніше.
  7. Поясніть, чому будь-яке незаряджене тіло завжди притягується до тіла, яке має електричний заряд.



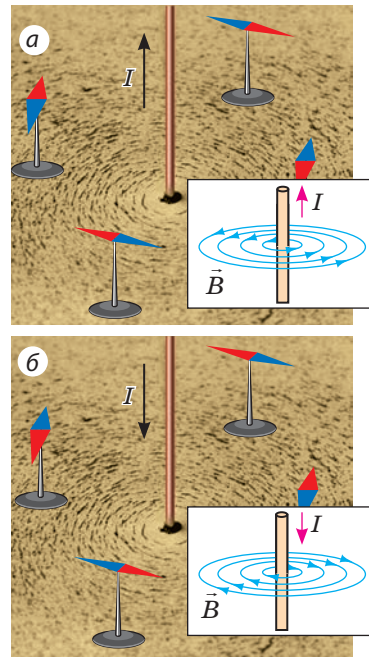
## § 3. МАГНІТНЕ ПОЛЕ СТРУМУ. ПРАВИЛО СВЕРДЛИКА

Ви вже знаєте, що навколо провідника зі струмом існує магнітне поле. Дослідимо це поле за допомогою залізних ошурок. Для цього провідник пропустимо через аркуш картону перпендикулярно до його поверхні, насиплемо на картон залізни ошурки та замкнемо коло. У магнітному полі провідника ошурки намагнітяться й відтворять картину ліній магнітної індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом — концентричні кола, що охоплюють провідник (див. рис. 3.1). А як визначити напрямок магнітних ліній?

### 1 Знайомимося з правилом свердлика

Розташуємо поряд із провідником декілька магнітних стрілок і пустимо в провіднику струм — стрілки зорієнтуються в магнітному полі провідника (рис. 3.1, *а*). Північний полюс кожної стрілки вкаже напрямок вектора індукції магнітного поля в даній точці, а отже, і напрямок магнітних ліній цього поля.

Зі зміною напрямку струму в провіднику зміниться й орієнтація магнітних стрілок (рис. 3.1, *б*). Це означає, що *напрямок магнітних ліній залежить від напрямку струму в провіднику*.



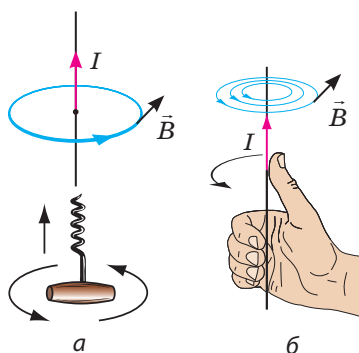
**Рис. 3.1.** Визначення напрямку ліній магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом за допомогою магнітних стрілок

Зрозуміло, що визначати напрямок ліній магнітної індукції за допомогою магнітної стрілки незручно, тому використовують **правило свердлика**:

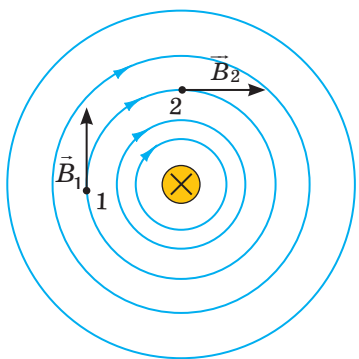
Якщо вкручувати свердлик за напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки свердлика вкаже напрямок ліній магнітного поля струму (рис. 3.2, а);

або інакше:

Якщо спрямувати великий палець правої руки за напрямком струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок ліній магнітного поля струму (рис. 3.2, б).



**Рис. 3.2.** Визначення напрямку ліній магнітного поля провідника зі струмом за допомогою правила свердлика



**Рис. 3.3.** Лінії магнітної індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом. Провідник розташований перпендикулярно до площини рисунка; хрестик (x) означає, що сила струму в провіднику направлена від нас

**?** Переконайтеся в справедливості правила свердлика для випадків, поданих на рис. 3.1.

## 2 З'ясуємо, від чого залежить модуль індукції магнітного поля провідника зі струмом

Згадайте: магнітну дію провідника зі струмом першим виявив Г. Ерстед у 1820 р. А от чому це відкриття не було зроблено раніше? Річ у тім, що зі збільшенням відстані від провідника магнітна індукція створеного ним магнітного поля значно зменшується. Отже, якщо магнітна стрілка розташована не поблизу провідника зі струмом, магнітна дія струму є майже непомітною.

**?** Розгляньте рис. 3.3. Чому зі збільшенням відстані від провідника щільність ліній магнітної індукції зменшується? Чи однаковими є модулі векторів  $\vec{B}_1$  і  $\vec{B}_2$ ?

Магнітна індукція залежить також від сили струму: зі збільшенням сили струму в провіднику магнітна індукція створеного ним магнітного поля збільшується.

## 3 Вивчаємо магнітне поле котушки зі струмом

Змотаємо ізольований дріт у котушку й пустимо в ньому струм. Якщо тепер навколо котушки розмістити магнітні стрілки, то до одного торця котушки стрілки повернуться північним полюсом, а до другого — південним (рис. 3.4). Отже, навколо котушки зі струмом існує магнітне поле.

Як і штабовий магніт, котушка зі струмом має два полюси — південний і північний. Полюси котушки розташовані на її торцях, і їх легко визначити за допомогою правої руки:

Якщо чотири зігнуті пальці правої руки спрямувати за напрямком струму в котушці, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрям на північний полюс котушки, тобто напрям вектора магнітної індукції всередині котушки (рис. 3.5).

Зіставивши магнітні лінії постійного штабового магніту та магнітні лінії котушки зі струмом, побачимо їхню надзвичайну схожість (рис. 3.6). Зазначимо: магнітна стрілка, підвішена котушка зі струмом і підвішений штабовий магніт орієнтуються в магнітному полі Землі однаково.

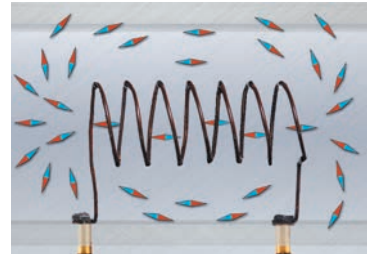


Рис. 3.4. Дослідження магнітного поля котушки зі струмом за допомогою магнітних стрілок

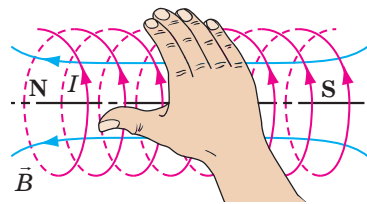


Рис. 3.5. Визначення полюсів котушки зі струмом за допомогою правої руки



### Підбиваємо підсумки

Навколо провідника зі струмом існує магнітне поле. Магнітна індукція поля, створеного струмом, зменшується зі збільшенням відстані від провідника та збільшується зі збільшенням сили струму в провіднику.

Напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом можна визначити за допомогою магнітних стрілок або за допомогою правила свердлика.

Котушка зі струмом, як і постійний магніт, має два полюси. Їх можна визначити за допомогою правої руки: якщо чотири зігнуті пальці правої руки спрямувати за напрямком струму в котушці, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрям на її північний полюс.

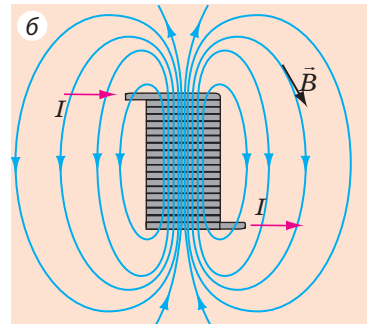
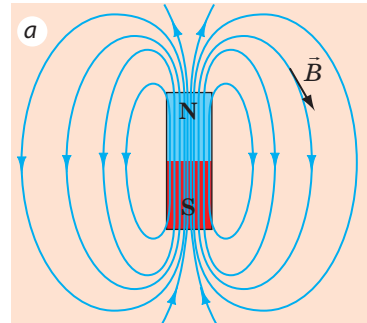


Рис. 3.6. Лінії магнітної індукції магнітного поля штабового магніту (а) і котушки зі струмом (б)



### Контрольні запитання

1. Як визначити напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом?
2. Сформулюйте правило свердлика.
3. Як магнітна індукція магнітного поля провідника зі струмом залежить від відстані до провідника? від сили струму в провіднику?
4. Який вигляд мають лінії магнітної індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом? котушки зі струмом?
5. Як визначити магнітні полюси котушки зі струмом?



### Вправа № 3

- На рис. 1 зображено лінію магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом. Яким є напрямок струму в провіднику?
- На рис. 2 зображено лінії магнітної індукції магнітних полів двох провідників зі струмом. 1) Як напрямлене магнітне поле провідника, зображеного на рис. 2, а? 2) Яким є напрямком струму в провіднику, зображеному на рис. 2, б? 3) Визначте, в якій точці — А чи В — магнітне поле є сильнішим (рис. 2, а, б).
- Яким полюсом має повернутися до нас магнітна стрілка (рис. 3)? Чи зміниться відповідь, якщо стрілку розташувати над провідником?
- Над котушкою підвішено магніт (рис. 4). Як поводитиметься магніт, якщо замкнути коло?
- Визначте полюси джерела струму на рис. 5.
- У деяких приладах прояви магнітного поля струму не є бажаними. У таких приладах використовують *біфілярну намотку*: провід скручують удвоє так, щоб обидва його кінці опинилися поряд. У чому сенс такої намотки?

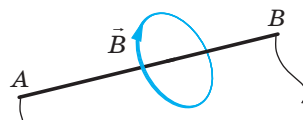


Рис. 1

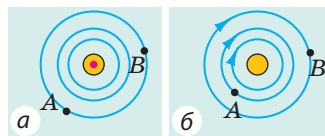


Рис. 2

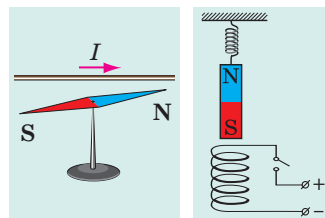


Рис. 3

Рис. 4

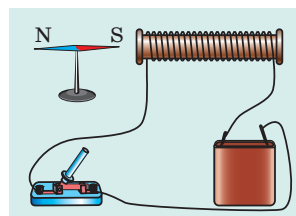


Рис. 5



### Експериментальне завдання

«Електромагнітний компас». Склейте паперовий циліндр діаметром 7–10 мм і завдовжки 4–5 см. Намотайте на одержаний каркас 20–30 витків тонкого ізольованого дроту. Закріпіть отриману котушку горизонтально на невеликій дощечці (або корку) та з'єднайте кінці проводу з батареєю гальванічних елементів. Визначте полюси котушки й позначте їх. Опустіть дощечку в широку посудину з водою. Електромагнітний компас готовий. Як він діятиме? Вставте в котушку залізний цвях. Чи буде тепер ваш компас працювати правильно?

### Фізика і техніка в Україні



**Олександр Ілліч Ахієзер** (1911–2000) — видатний український фізик-теоретик, академік НАНУ, засновник наукової школи з теоретичної фізики. Серед його учнів — академіки В. Г. Бар'яхтар, Д. В. Волков, С. В. Пелетмінський, О. Г. Ситенко і понад 30 членів-кореспондентів і докторів наук.

Досліджуючи взаємодію ультразвуку з кристалами, О. І. Ахієзер розробив механізм поглинання, зумовлений модуляцією енергії квазічастинки зовнішнім полем, який отримав назву «механізм Ахієзера». Вчений є автором теорії резонансних ядерних реакцій, здобув фундаментальні результати під час дослідження фізики плазми, разом з учнями сформулював основи електродинаміки плазми. Спільно з В. Г. Бар'яхтаром і С. В. Пелетмінським науковець відкрив нове явище — магнітоакустичний резонанс.

Іменем О. І. Ахієзера названо Інститут теоретичної фізики, що є структурним підрозділом Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут».

## § 4. СИЛА АМПЕРА

Із матеріалу § 1 ви дізналися, що магнітне поле діє на провідник зі струмом із деякою силою. А з курсу фізики 8 класу пам'ятаєте, що сила — це векторна фізична величина, тому, щоб повністю визначити силу, слід уміти розраховувати її значення та визначити напрямок. Від чого залежить значення сили, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, як напрямлена ця сила та чому її називають силою Ампера, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Характеризуємо силу, яка діє на провідник зі струмом

Візьмемо прямий провідник, виготовлений з алюмінію, і підвісимо його на тонких і гнучких проводах таким чином, щоб він був розташований між полюсами підковоподібного постійного магніту (рис. 4.1, а). Якщо в провіднику пропустити струм, провідник відхилиться від положення рівноваги (рис. 4.1, б). Причиною такого відхилення є сила, що діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля. Довів наявність цієї сили і з'ясував, від чого залежать її значення та напрямок, А. Ампер. Саме тому цю силу називають *силою Ампера*.

**Сила Ампера** — це сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом.

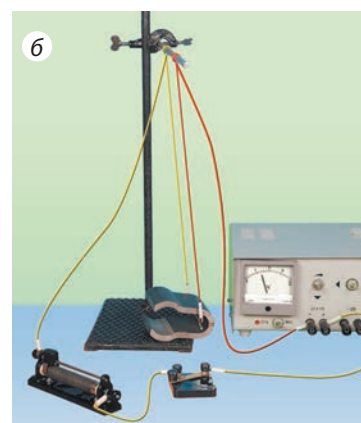
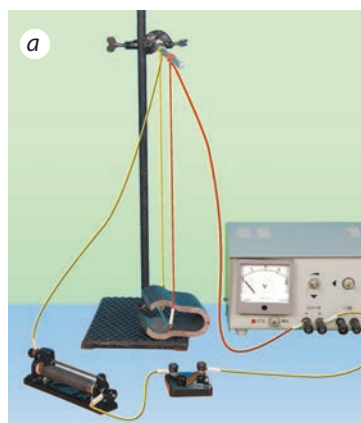
Сила Ампера прямо пропорційна силі струму в провіднику та довжині активної частини провідника (тобто частини, яка розташована в магнітному полі). Сила Ампера збільшується зі збільшенням індукції магнітного поля і залежить від того, під яким кутом до ліній магнітної індукції розташований провідник.

Значення сили Ампера ( $F_A$ ) обчислюють за формулою:

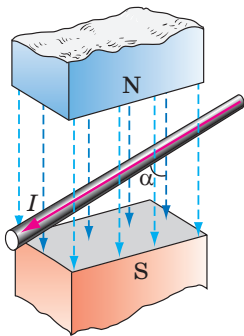
$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де  $B$  — магнітна індукція магнітного поля;  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина активної частини провідника;  $\alpha$  — кут між напрямком вектора магнітної індукції і напрямком струму в провіднику (рис. 4.2).

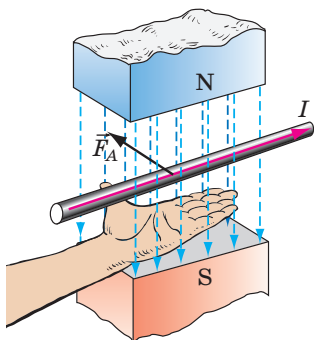
*Зверніть увагу!* Магнітне поле не діятиме на провідник зі струмом ( $F_A=0$ ), якщо



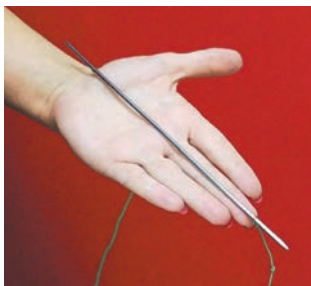
**Рис. 4.1.** Дослід, який демонструє дію магнітного поля на алюмінієвий провідник: у разі відсутності струму магнітне поле на провідник не діє (а); якщо в провіднику тече струм, на провідник діє магнітне поле і провідник відхиляється (б)



**Рис. 4.2.** Кут  $\alpha$  — це кут між напрямком вектора магнітної індукції і напрямком струму в провіднику



**Рис. 4.3.** Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки



**Рис. 4.4.** До завдання в § 4

провідник розташований паралельно магнітним лініям поля ( $\sin \alpha = 0$ ).

Щоб визначити напрямок сили Ампера, використовують **правило лівої руки**:

Якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера (рис. 4.3).

**?** На рис. 4.4 показано визначення напрямку сили Ампера, яка діє на провідник, розташований в однорідному магнітному полі. Визначте напрямок струму в провіднику, напрямок магнітної індукції та напрямок сили Ампера.

## 2 Отримуємо формулу для визначення модуля магнітної індукції

Якщо провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$ ), то поле діє на провідник із максимальною силою:

$$F_{A\max} = BIl$$

Звідси отримуємо **формулу для визначення модуля магнітної індукції**:

$$B = \frac{F_{A\max}}{Il}$$

*Зверніть увагу!* Значення магнітної індукції не залежить ані від сили струму в провіднику, ані від довжини провідника, а залежить тільки від властивостей магнітного поля.

Наприклад, якщо зменшити силу струму в провіднику, то зміниться й сила Ампера, з якою магнітне поле діє на провідник, а от значення магнітної індукції залишиться незмінним.

У СІ одиниця магнітної індукції — тесла (Тл), одиниця сили — ньютон (Н), сили струму — ампер (А), довжини — метр (м), тому:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

1 Тл — це індукція такого однорідного магнітного поля, яке діє із максимальною силою 1 Н на провідник завдовжки 1 м, у якому тече струм силою 1 А.

### 3 Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** Доведіть, що два паралельні провідники, в яких течуть струми одного напрямку, притягуються.

*Аналіз фізичної проблеми.* Навколо будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле, отже, кожен із двох провідників перебуває в магнітному полі іншого. На перший провідник діє сила Ампера з боку магнітного поля, створеного струмом у другому провіднику, і навпаки. Визначивши за правилом лівої руки напрямки цих сил, з'ясуємо, як поводитимуться провідники.

#### Розв'язання

У ході розв'язання виконаємо пояснювальні рисунки: зобразимо провідники  $A$  і  $B$ , покажемо напрямки струму в них та ін.

Визначимо напрямки сили Ампера, яка діє на провідник  $A$ , що перебуває в магнітному полі провідника  $B$ .

1) За допомогою правила свердлика визначимо напрямки ліній магнітної індукції магнітного поля, створеного провідником  $B$  (рис. 1, *а*). З'ясується, що біля провідника  $A$  магнітні лінії напрямлені до нас (позначка «•»).

2) Skorиставшись правилом лівої руки, визначимо напрямки сили Ампера, яка діє на провідник  $A$  з боку магнітного поля провідника  $B$  (рис. 1, *б*).

3) Доходимо висновку: провідник  $A$  притягується до провідника  $B$ .

Тепер знайдемо напрямки сили Ампера, яка діє на провідник  $B$ , що перебуває в магнітному полі провідника  $A$ .

1) Визначимо напрямки ліній магнітної індукції магнітного поля, створеного провідником  $A$  (рис. 2, *а*). З'ясується, що біля провідника  $B$  магнітні лінії напрямлені від нас (позначка «×»).

2) Визначимо напрямки сили Ампера, яка діє на провідник  $B$  (рис. 2, *б*).

3) Доходимо висновку: провідник  $B$  притягується до провідника  $A$ .

*Відповідь:* два паралельні провідники, в яких течуть струми одного напрямку, дійсно притягуються.

**Задача 2.** Прямий провідник (стрижень) завдовжки  $0,1$  м і масою  $40$  г перебуває в горизонтальному однорідному магнітному полі індукцією  $0,5$  Тл. Стрижень розташований перпендикулярно до магнітних ліній поля (рис. 3). Струм якої сили та в якому напрямку слід пропустити в стрижні, щоб він не тиснув на опору (завис у магнітному полі)?

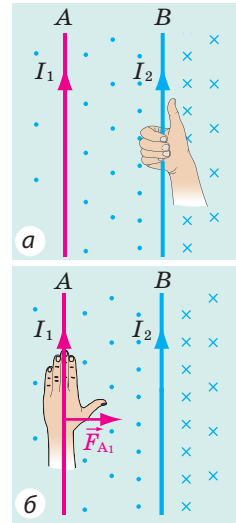


Рис. 1

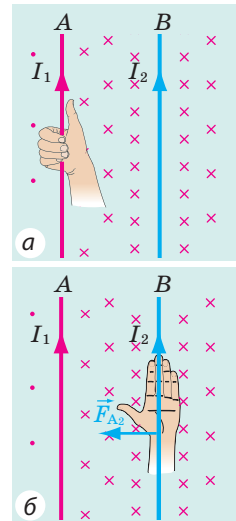


Рис. 2

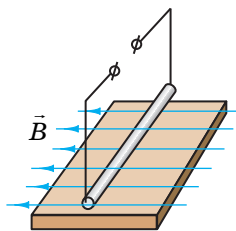


Рис. 3

*Аналіз фізичної проблеми.* Стрижень не буде тиснути на опору, якщо сила Ампера зрівноважить силу тяжіння. Це відбудеться за таких умов: 1) сила Ампера буде напрямлена протилежно силі тяжіння (тобто вертикально вгору); 2) значення сили Ампера дорівнюватиме значенню сили тяжіння:  $F_A = F_{\text{тяж}}$ .  
Напрямок струму визначимо, скориставшись правилом лівої руки.

Дано:

$$l = 0,1 \text{ м}$$

$$m = 40 \text{ г} = 0,04 \text{ кг}$$

$$B = 0,5 \text{ Тл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$$

Знайти:

$$I - ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

1. Визначимо напрямок струму. Для цього розташуємо ліву руку так, щоб лінії магнітного поля входили в долоню, а відігнутий на  $90^\circ$  великий палець був напрямлений вертикально вгору. Чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок від нас. Отже, струм у провіднику слід спрямувати від нас.

2. Враховуємо, що  $F_A = F_{\text{тяж}}$ .

$$F_A = BIl \sin \alpha, \text{ де } \sin \alpha = 1; F_{\text{тяж}} = mg.$$

Отже,  $BIl = mg$ .

Із останнього виразу знайдемо силу струму:  $I = \frac{mg}{Bl}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини.

$$\text{Згадаємо: Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}; [I] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \text{А}, I = \frac{0,04 \cdot 10}{0,5 \cdot 0,1} = \frac{40}{5} = 8 \text{ (А)}.$$

*Відповідь:*  $I = 8 \text{ А}$ ; від нас.



### Підбиваємо підсумки

Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, називають силою Ампера. Значення сили Ампера обчислюють за формулою:  $F_A = BIl \sin \alpha$ , де  $B$  — індукція магнітного поля;  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина активної частини провідника;  $\alpha$  — кут між напрямком вектора магнітної індукції і напрямком струму в провіднику.

Для визначення напрямку сили Ампера використовують правило лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітного поля входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера.



### Контрольні запитання

1. Опишіть дослід на підтвердження того, що в магнітному полі на провідник зі струмом діє сила. 2. Дайте означення сили Ампера. 3. Від яких чинників залежить значення сили Ампера? За якою формулою її визначають? 4. Як слід розташувати провідник, щоб сила Ампера була найбільшою? У якому випадку магнітне поле не діє на провідник? 5. Сформулюйте правило для визначення напрямку сили Ампера. 6. Наведіть формулу для визначення модуля магнітної індукції. 7. Дайте означення одиниці магнітної індукції.





### Вправа № 4

- На рис. 1 зображено для кількох випадків напрямок струму в провіднику та напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля. Визначте напрямок сили Ампера для кожного випадку  $a$ – $г$ .

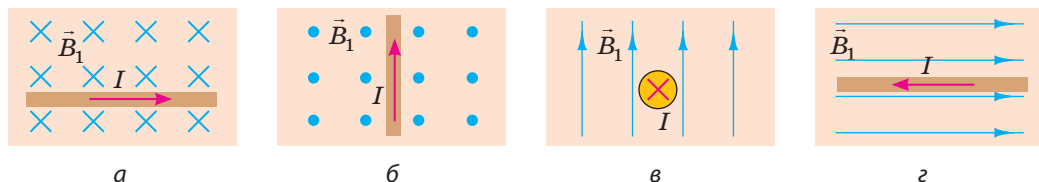


Рис. 1

- У прямолинійному провіднику завдовжки 60 см тече струм силою 1,2 А. Провідник розташований в однорідному магнітному полі індукцією 1,5 Тл. Визначте найбільше та найменше значення сили Ампера, яка може діяти на провідник.
- Провідник зі струмом відхиляється в магнітному полі постійного магніту. Визначте: а) полюси магніту (рис. 2); б) полюси джерела струму (рис. 3).
- В однорідному магнітному полі індукцією 40 мТл на прямолинійний провідник зі струмом 2,5 А діє сила Ампера 60 мН. Визначте: а) якою є довжина провідника, якщо він розташований під кутом  $30^\circ$  до ліній магнітної індукції; б) яку роботу виконало магнітне поле, якщо під дією сили Ампера провідник перемістився на 0,5 м у напрямку цієї сили?
- Доведіть, що два провідники, в яких ідуть струми протилежних напрямків, відштовхуються.
- Горизонтальний провідник масою 5 г і завдовжки 10 см лежить на рейках у вертикальному магнітному полі індукцією 25 мТл (рис. 4). Визначте: а) у якому напрямку рухатиметься провідник, якщо замкнути електричне коло; б) коефіцієнт тертя, якщо за сили струму в провіднику 5 А провідник рухається прямолинійно рівномірно.
- Складіть задачу, обернену до задачі 2, поданої в пункті 3 § 4.

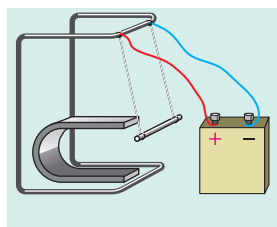


Рис. 2

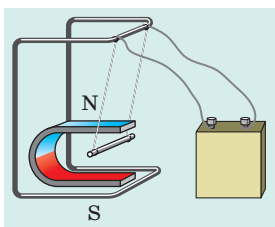


Рис. 3

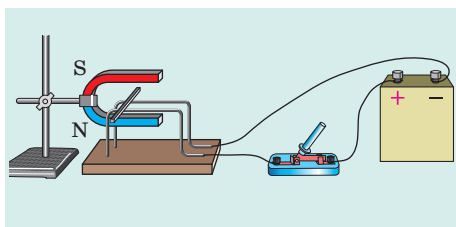


Рис. 4



### Експериментальне завдання

«Солений двигун». Підвісьте до м'якої металевої пружини залізний цвях; вістря цвяха розмістіть у розчині кухонної солі так, щоб воно лише торкалося рідини (див. рис. 5). Складіть електричне коло, як показано на рис. 5. Замкніть коло — цвях почне коливатися, розімкніть коло — коливання швидко припиняться. Поясніть спостережуване явище.

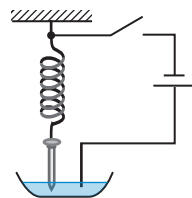
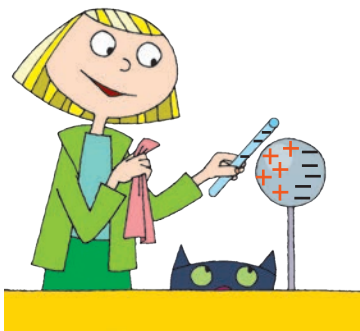


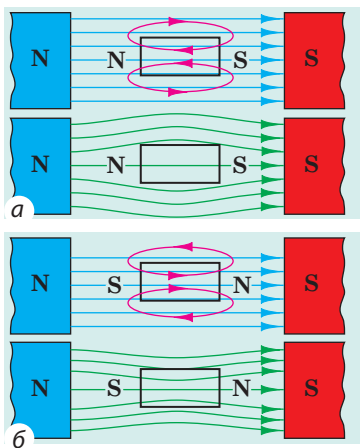
Рис. 5

## § 5. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИН. ГІПОТЕЗА АМПЕРА

Мабуть, кожен із вас бачив магніти й навіть досліджував їхні властивості. Згадайте: ви підносите магніт до купки дрібних предметів і бачите, що деякі предмети (цвяшки, кнопки, скріпки) чіпляються до магніту, а деякі (шматочки крейди, мідні та алюмінієві монетки, грудочки землі) не реагують на нього. Чому так? Чи дійсно магнітне поле не чинить жодного впливу на деякі речовини? Саме про це йтиметься в параграфі.



**Рис. 5.1.** Унаслідок дії електричного поля негативно зарядженої палички ближча до неї частина провідної сфери набуває позитивного заряду



**Рис. 5.2.** Зразки з діамагнетика (а) і парамагнетика (б) у зовнішньому магнітному полі: червоні лінії — лінії магнітного поля, створеного зразком; сині лінії — магнітні лінії зовнішнього магнітного поля; зелені лінії — лінії результуючого магнітного поля

### 1 Порівнюємо дії електричного і магнітного полів на речовину

Вивчаючи у 8 класі електричні явища, ви дізналися, що внаслідок впливу зовнішнього електричного поля відбувається перерозподіл електричних зарядів усередині незарядженого тіла (рис. 5.1). У результаті в тілі утворюється власне електричне поле, напрямлене протилежно зовнішньому. Саме тому електричне поле в речовині завжди послаблюється.

Речовина змінює і магнітне поле. Існують речовини, які (як у випадку з електричним полем) послаблюють магнітне поле всередині себе. Такі речовини називають *діамагнетиками*. Багато речовин, навпаки, посилюють магнітне поле — це *парамагнетики* та *феромагнетики*.

Річ у тім, що *будь-яка речовина, поміщена в магнітне поле, намагнічується*, тобто створює власне магнітне поле, і магнітна індукція такого поля є різною для різних речовин.

### 2 Дізнаємося про слабомагнітні речовини

Речовини, які намагнічуються, створюючи слабе магнітне поле, магнітна індукція якого набагато менша за магнітну індукцію зовнішнього магнітного поля (тобто поля, яке спричинило намагнічування), називають *слабомагнітними речовинами*. До таких речовин належать діамагнетики та парамагнетики.

**Діамагнетики** (від грецьк. *dia* — розбіжність) намагнічуються, створюючи *слабке магнітне поле, яке напрямлене протилежно до зовнішнього* (рис. 5.2, а). Саме тому діамагнетики *незначно послаблюють зовнішнє магнітне поле*: магнітна індукція магнітного поля всередині діамагнетика ( $B_d$ ) трохи менша

від магнітної індукції зовнішнього магнітного поля ( $B_0$ ):

$$B_d \leq B_0; \frac{B_d}{B_0} \approx 0,9998$$

Якщо діамагнетик помістити в магнітне поле, він буде виштовхуватися з нього (рис. 5.3).

**?** Розгляньте рис. 5.2, а і поясніть, чому діамагнітна речовина виштовхується з магнітного поля.

До діамагнетиків належать інертні гази (гелій, неон тощо), багато металів (наприклад, золото, мідь, ртуть, срібло), молекулярний азот, вода та ін. Тіло людини є діамагнетиком, адже воно в середньому на 78 % складається з води.

**Парамагнетики** (від грецьк. *para* — поряд) намагнічуються, створюючи *слабке магнітне поле, напрямлене в бік зовнішнього магнітного поля* (рис. 5.2, б). Парамагнетики незначно посилюють зовнішнє поле: магнітна індукція магнітного поля всередині парамагнетика ( $B_{\text{п}}$ ) трохи більша за магнітну індукцію зовнішнього магнітного поля ( $B_0$ ):

$$B_{\text{п}} \geq B_0; \frac{B_{\text{п}}}{B_0} \approx 1,001$$

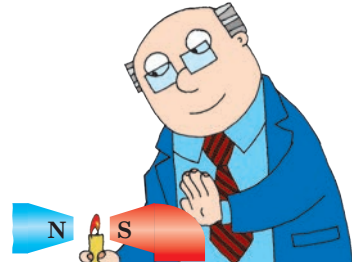
До парамагнетиків належать кисень, платина, алюміній, лужні та лужноземельні метали тощо. Якщо парамагнітну речовину помістити в магнітне поле, то вона буде втягуватися в нього.

### 3 Вивчаємо феромагнетики

Якщо слабوماгнітні речовини виїняти з магнітного поля, то їхня намагніченість відразу зникне, на відміну від *сильномагнітних речовин* — *феромагнетиків*.

**Феромагнетики** (від латин. *ferrum* — залізо) — речовини або матеріали, які залишаються намагніченими й у разі відсутності зовнішнього магнітного поля.

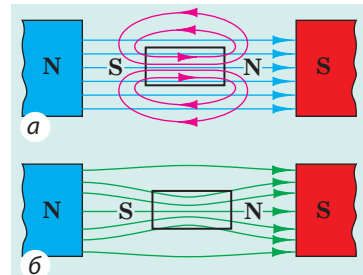
Феромагнетики намагнічуються, створюючи *сильне магнітне поле, напрямлене в бік зовнішнього магнітного поля* (рис. 5.4, 5.5, а). Якщо виготовлене з феромагнетика тіло помістити в магнітне поле, то воно буде втягуватися в це поле (рис. 5.5, б).



**Рис. 5.3.** Полум'я свічки виштовхується з магнітного поля, оскільки продукти згоряння є діамагнітними частинками



**Рис. 5.4.** Залізний цвях намагнічується в магнітному полі таким чином, що кінець цвяха, розташований біля північного полюса магніту, стає південним полюсом, тому цвях притягується до магніту



**Рис. 5.5.** Феромагнетики створюють сильне магнітне поле, напрямлене в бік зовнішнього магнітного поля (а); лінії магнітної індукції ніби втягуються у феромагнітний зразок (б)



Рис. 5.6. До завдання в § 5

**?** Поясніть, чому на постійному магніті утримуються тільки предмети, виготовлені з феромагнітних матеріалів (рис. 5.6)?

До феромагнетиків належить невелика група речовин: залізо, нікель, кобальт, рідкісноземельні речовини та низка сплавів. Феромагнетики значно посилюють зовнішнє магнітне поле: магнітна індукція магнітного поля всередині феромагнетиків ( $B_{\Phi}$ ) у сотні й тисячі разів більша за магнітну індукцію зовнішнього магнітного поля ( $B_0$ ):

$$B_{\Phi} \gg B_0$$

*Температура Кюрі  
для деяких феромагнетиків*

Речовина (або матеріал)	Температура, °C
Гадоліній	+19
Залізо	+770
Кобальт	+1127
Неодимовий магніт NdFeB	+320
Нікель	+354

Так, кобальт посилює магнітне поле в 175 разів, нікель — у 1120 разів, а трансформаторна сталь (вона на 96–98 % складається із заліза) — у 8000 разів.

Феромагнітні матеріали умовно поділяють на два типи. Матеріали, які після припинення дії зовнішнього магнітного поля залишаються намагніченими довгий час, називають *магнітожорсткими феромагнетиками*. Їх застосовують для виготовлення постійних магнітів. Феромагнітні матеріали, які легко намагнічуються і швидко розмагнічуються, називають *магнітом'якими феромагнетиками*. Їх застосовують для виготовлення осердь електромагнітів, двигунів, трансформаторів, тобто пристроїв, які під час роботи постійно перемагнічуються (про будову та принцип дії таких пристроїв ви дізнаєтеся пізніше).

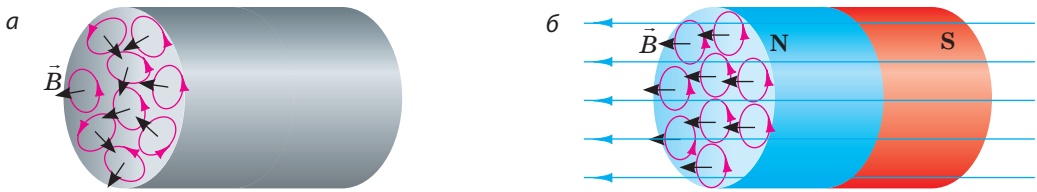
Зверніть увагу! У разі досягнення *температури Кюрі* (див. таблицю) феромагнітні властивості магнітом'яких і магнітожорстких матеріалів зникають — *матеріали стають парамагнетиками*.

#### **4** Знайомимося з гіпотезою Ампера

Спостерігаючи дію провідника зі струмом на магнітну стрілку (див. рис. 1.1) і з'ясувавши, що котушки зі струмом поведуться як постійні магніти (див. рис. 1.3), А. Ампер висунув гіпотезу щодо пояснення магнітних властивостей речовин.

Ампер припустив, що всередині речовини існує величезна кількість незгасаючих малих колових струмів і що кожний коловий струм, ніби маленька котушка, є магнітиком. Постійний магніт складається з безлічі таких елементарних магнітиків, орієнтованих у певному напрямку.

Механізм намагнічування речовин Ампер пояснював так. У тілі, яке не є намагніченим, колові струми орієнтовані безладно (рис. 5.7, а). Зовнішнє магнітне поле намагається зорієнтувати ці струми так, щоб напрямок магнітного поля кожного струму збігався з напрямком зовнішнього магнітного



**Рис. 5.7.** Механізм намагнічування тіл відповідно до гіпотези Ампера: *а* — колові струми орієнтовані безладно, тіло не є намагніченим; *б* — колові струми орієнтовані в певному напрямку, тіло намагнічене

поля (рис. 5.7, б). У деяких речовин така орієнтація струмів (намагнічення) залишається й після усунення зовнішнього магнітного поля. Отже, усі магнітні явища Ампер пояснював взаємодією рухомих заряджених частинок.

Гіпотеза Ампера стала поштовхом до створення теорії магнетизму. На підставі цієї гіпотези були пояснені відомі властивості феромагнетиків. Проте, спираючись на гіпотезу Ампера, неможливо було пояснити природу діа- та парамагнетизму, а також те, чому тільки невелика кількість речовин має феромагнітні властивості. Сучасна теорія магнетизму ґрунтується на законах квантової механіки і теорії відносності А. Ейнштейна.



### Підбиваємо підсумки

Будь-яка речовина, поміщена в магнітне поле, намагнічується, тобто створює власне магнітне поле.

Діамагнетики	Парамагнетики	Феромагнетики
Намагнічуються, створюючи слабке магнітне поле, напрямлене протилежно зовнішньому магнітному полю	Намагнічуються, створюючи слабке магнітне поле, напрямлене в бік зовнішнього магнітного поля	Намагнічуються, створюючи сильне магнітне поле, напрямлене в бік зовнішнього; залишаються намагніченими в разі зникнення зовнішнього магнітного поля
Незначно послаблюють зовнішнє магнітне поле, виштовхуються з нього	Незначно посилюють зовнішнє магнітне поле, втягуються в нього	Посилюють зовнішнє магнітне поле в сотні й тисячі разів, втягуються в нього
Інертні гази, золото, мідь, ртуть, срібло, азот, вода та ін.	Кисень, платина, алюміній, лужні та лужноземельні метали тощо	Залізо, нікель, кобальт, рідкісноземельні речовини (наприклад, неодим), низка сплавів



### Контрольні запитання

**1.** Чому речовина змінює магнітне поле? **2.** Наведіть приклади діамагнетиків; парамагнетиків; феромагнетиків. **3.** Як напрямлене власне магнітне поле діамагнетика? парамагнетика? феромагнетика? **4.** Як у зовнішньому магнітному полі поводить ся тіло, виготовлене з діамагнетика? парамагнетика? феромагнетика? **5.** Чому феромагнітні матеріали вважають сильномагнітними? **6.** Де застосовують магнітом'які матеріали? магнітожорсткі матеріали? **7.** Як А. Ампер пояснював намагніченість феромагнетиків?



### Вправа № 5

- Є два види сталі — магнітом'яка та магнітожоретка. Яка сталь є більш придатною для виготовлення постійних магнітів?
- Які магнітні властивості матиме: а) залізо за 900 °С? б) кобальт за 900 °С?
- Мідний циліндр підвісили на пружині та помістили в сильне магнітне поле (рис. 1). Як при цьому змінилося видовження пружини?
- Чому на постійному магніті можна тримати ланцюжок залізних предметів (рис. 2)?
- У посудині під великим тиском міститься суміш газів (азоту і кисню). Запропонуйте спосіб розділення цієї суміші на окремі компоненти.
- Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про магнітну левітацію. Якими є перспективи її застосування?

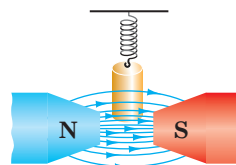


Рис. 1



Рис. 2



### Експериментальне завдання

Використавши досить сильний магніт, дослідіть його взаємодію з тілами, виготовленими з різних матеріалів (наприклад, з міді, алюмінію, заліза).

## і

## § 6. ЕЛЕКТРОМАГНІТИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Електричний шкільний дзвоник, електродвигун, підймальний кран на складі металобрухту, збагачувач залізної руди... Як пов'язані ці, на перший погляд зовсім різні, пристрої? Обізнана людина відповість, що в кожному використовується електромагніт. Отже, з'ясуємо, що таке електромагніт, і дізнаємося про те, як він працює.

### 1 З'ясовуємо, від чого залежить магнітна дія котушки зі струмом

Складемо електричне коло з джерела струму, котушки, реостата й амперметра. Для оцінки магнітної дії котушки зі струмом скористаємося залізним циліндром, який підвісимо на динамометр, розміщений над котушкою



Рис. 6.1. Дослідження магнітної дії котушки зі струмом

(рис. 6.1). Якщо замкнути коло, циліндр намагнітиться в магнітному полі котушки й притягнеться до неї, додатково розтягнувши пружину динамометра.

Зрозуміло, що циліндр притягуватиметься до котушки тим сильніше, чим сильніша її магнітна дія.

Змінюючи за допомогою реостата силу струму в котушці, виявимо, що в разі збільшення сили струму циліндр притягується до котушки сильніше, про що свідчить

більше розтягнення пружини динамометра. У разі збільшення сили струму в котушці її магнітна дія посилюється.

Замінивши котушку на іншу — з більшим числом витків, побачимо, що за тієї самої сили струму видовження пружини динамометра збільшиться. У разі збільшення числа витків у котушці її магнітна дія посилюється.

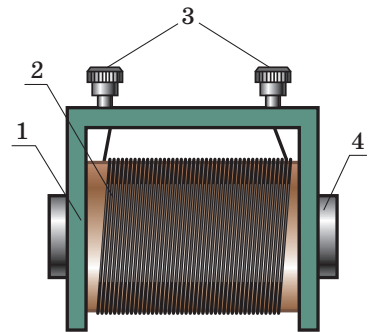
Уведемо всередину котушки осердя — товстий стрижень, виготовлений із феромагнітного матеріалу. Увімкнемо струм — циліндр спрямується до котушки та «прилипне» до осердя. Магнітна дія котушки значно посилюється в разі введення в її середину феромагнітного осердя.

**?** Згадайте магнітні властивості речовин і поясніть, чому для виготовлення осердя використовують феромагнітні матеріали. Чи збільшиться магнітна дія котушки, якщо осердя виготовити з міді або алюмінію?

## 2 Дізнаємося про будову електромагнітів і сферу їх застосування

Котушку з уведеним усередину осердям із феромагнітного матеріалу називають **електромагнітом**.

Розглянемо будову електромагніта (рис. 6.2). Будь-який електромагніт має *каркас* (1), виготовлений із діелектрика. На каркас щільно намотаний ізольований дріт — це *обмотка* електромагніта (2). Кінці обмотки підведені до *клем* (3), за допомогою яких електромагніт приєднують до джерела струму. У середині каркаса розміщене *осердя* (4), виготовлене з м'якомагнітної сталі. Осерддю електромагніта часто надають підковоподібної форми, оскільки завдяки цьому магнітна дія електромагніта значно посилюється.



**Рис. 6.2.** Будова електромагніта: 1 — каркас; 2 — обмотка; 3 — клемми; 4 — осердя

Електромагніти широко застосовують в техніці насамперед тому, що їхню магнітну дію легко регулювати — достатньо змінити силу струму в обмотці. Крім того, електромагніти можна виготовити будь-яких форм і розмірів. Важко знайти галузь техніки, де б не застосовували електромагніти: вони містяться в багатьох побутових пристроях (рис. 6.3), входять до складу



**Рис. 6.3.** У багатьох побутових приладах використовують електромагніти



**Рис. 6.4.** Після замикання кола залізні ошурки притягуються до осердя (а); після розмикання кола — відпадають від нього (б)



**Рис. 6.5.** Електромагнітний підймальний кран

електродвигунів та електричних генераторів, електровимірювальних приладів і медичної апаратури. Гігантські електромагніти використовують у прискорювачах заряджених частинок (див. «Енциклопедичну сторінку» на с. 52–53).

Розглянемо застосування електромагнітів в електромагнітних підймальних кранах та електромагнітному реле.

### 3 Вивчаємо принцип дії електромагнітного підймального крана й електромагнітного реле

Складемо електричне коло з джерела струму й електромагніта. Замкнувши коло, побачимо, що залізні ошурки притяглися до осердя електромагніта, отже, можемо перенести їх, наприклад, на інший кінець столу (рис. 6.4).

Саме за таким принципом працюють **електромагнітні підймальні крани**, які переносять важкі залізні болванки, металобрухт тощо (рис. 6.5). І не потрібні ніякі гаки! Увімкнули струм — залізні предмети притяглися до електромагніта і їх перенесли в потрібне місце, вимкнули струм — залізні предмети припинили притягуватись і залишились там, куди їх перенесли.

На підприємствах часто застосовують споживачі електроенергії, сила струму в яких сягає сотень і тисяч амперів. Замикальний пристрій і споживач з'єднані послідовно, тому через замикальний пристрій має проходити струм великої сили. А це становить небезпеку для людей, які працюють за пультом керування.

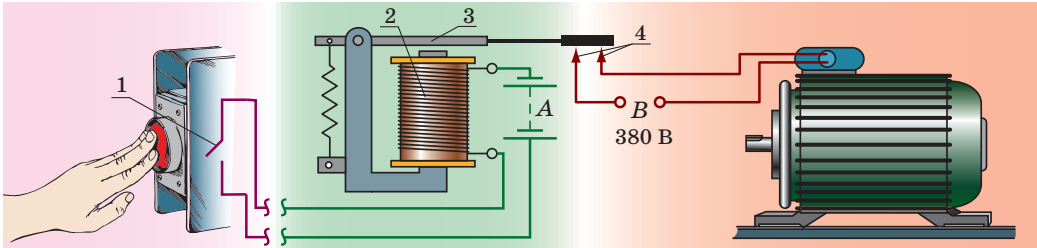
На допомогу приходять **електромагнітні реле** — пристрої для керування електричним колом (рис. 6.6). Зверніть увагу: замикальний пристрій (1), установлений на пульті керування, та електромагніт (2) приєднані до джерела струму А з малою напругою на виході, а споживач (на рис. 6.6 це електродвигун) живиться від потужного джерела В.



#### Підбиваємо підсумки

Магнітна дія котушки зі струмом посилюється, якщо в ній збільшити число витків; збільшити силу струму; внести всередину котушки осердя з феромагнітного матеріалу.





**Рис. 6.6.** Принцип дії електромагнітного реле. Коли замикають *ключ* (1) (натискають кнопку), в *обмотці електромагніта* (2) йде слабкий безпечний струм. Унаслідок цього залізне осердя електромагніта притягує до себе *якір* (3). Коли якір опускається і замикає *контакти* (4), замикається коло електродвигуна, який споживає струм значно більшої сили

Котушку з уведеним усередину осердям, виготовленим із магнітом'якої сталі, називають електромагнітом. Електромагніти широко застосовують у техніці, адже їхню магнітну дію легко регулювати, змінюючи силу струму в обмотці; електромагніти можна виготовити будь-яких форм і розмірів.



### Контрольні запитання

1. Від чого і як саме залежить магнітна дія котушки зі струмом? Опишіть дослід на підтвердження вашої відповіді.
2. Що таке електромагніт? Опишіть його будову.
3. Чому електромагніти набули широкого застосування в техніці?
4. Поясніть принцип дії електромагнітного підйомального крана.
5. Для чого призначено електромагнітне реле? Опишіть принцип його дії.



### Вправа № 6

1. Замість магнітом'якої сталі для виготовлення осердя електромагніта використали магнітожорсткий матеріал. Які недоліки матиме такий електромагніт?
2. Намотавши на залізний цвях ізольований дріт і з'єднавши кінці дроту з батареєю гальванічних елементів, одержали найпростіший електромагніт (рис. 1). Визначте полюси цього електромагніта.
3. До якої пари затискачів електромагнітного реле (рис. 2) слід приєднати джерело слабого (керувального) струму?
4. Як зміниться підймальна сила електромагніта, якщо пересунути повзунок реостата праворуч (рис. 3)? Відповідь обґрунтуйте.
5. На рис. 4 подано схему будови пристрою, який автоматично спрацьовує за певної температури. Назвіть основні частини цього пристрою, поясніть принцип його дії. Де доцільно встановлювати такі автоматичні пристрої?

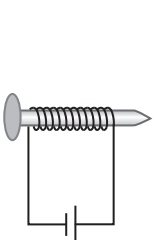


Рис. 1

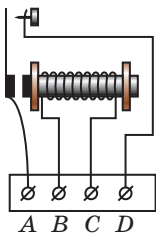


Рис. 2

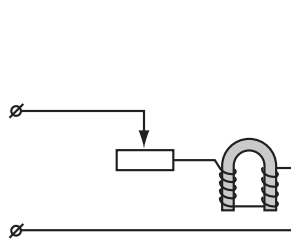


Рис. 3

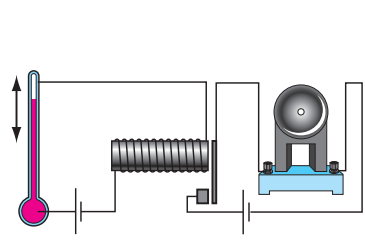


Рис. 4

6. Skorистavshись рис. 5, спробуйте розібратися, як працює електричний дзвінок. Якщо не вийде, то зверніться до додаткових джерел інформації.
7. Skorистайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про технологію магнітної сепарації і про те, в яких пристроях використовують цю технологію. Підготуйте коротке повідомлення.
8. Дайте характеристику сили як фізичної величини: що вона характеризує, яким символом її позначають, скалярна це величина чи векторна, якими є її одиниці в СІ.



### Експериментальне завдання

Виготовте електромагніт: намотайте на залізний цвях ізольований дріт і з'єднайте його кінці з батареєю гальванічних елементів (див. рис. 1). Розімкнувши коло, закріпіть електромагніт горизонтально на деякій відстані від поверхні столу. Змішайте дрібні шматочки паперу, зерна рису та дрібні залізні предмети (краще ошурки). Замкніть коло. Повільно просипаючи суміш повз голівку цвяха, відокремте залізні предмети. Подумайте, як удосконалити цей пристрій.

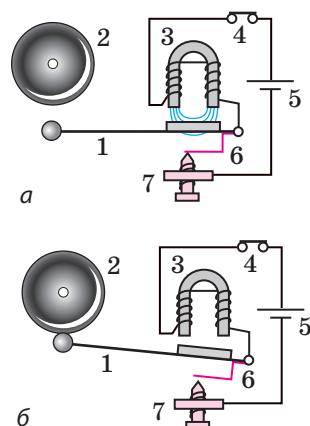


Рис. 5. Схема дії електричного дзвінка: 1 — молоточок; 2 — чаша дзвінка; 3 — дугоподібний електромагніт; 4 — кнопка; 5 — джерело струму; 6 — контактна пружина, яка торкається гвинта 7

## i

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1



**Тема.** Складання та випробування електромагніта.

**Мета:** навчитися виготовляти найпростіший електромагніт; з'ясувати, від чого залежить його магнітна дія.

**Обладнання:** амперметр, пробник або динамометр, магнітна стрілка або компас, ізольований мідний дріт, джерело постійного струму, два залізні стрижні (або великі цвяхи), залізні ошурки, реостат, ключ, з'єднувальні проводи, штатив (якщо використовуватиметься динамометр).

### Теоретичні відомості

Для оцінки магнітної дії електромагніта можна скористатися *пробником* (рис. 1). Він складається зі сталеві пластинки (1), яку закріплено за допомогою пружини (2) усередині пластикового корпусу (3). На сталеву пластинку пробника нанесено шкалу (4). Якщо пластинку пробника піднести до електромагніта, магнітне поле електромагніта буде діяти на пластинку. Пластинка притягуватиметься до електромагніта тим більше, чим сильніша його магнітна дія. Силу притягання оцінюють за шкалою.

У разі відсутності пробника силу притягання електромагніта можна виміряти за допомогою *динамометра* (див. рис. 6.1).

## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

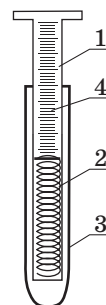


Рис. 1

### II Підготовка до експерименту

- Перед виконанням роботи згадайте:
  - 1) вимоги безпеки під час роботи з електричними колами;
  - 2) правила, яких необхідно дотримуватися під час вимірювання сили струму амперметром;
  - 3) як залежить магнітна дія електромагніта від сили струму, кількості витків і наявності залізного осердя.
- Визначте ціни поділки шкал амперметра та динамометра.

### ▶ Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника).*

- Виготовте два електромагніти з різною кількістю витків в обмотці. Для цього візьміть два однакові залізні стрижні й намотайте на них різну кількість витків ізоляованого мідного дроту: на один стрижень — 20 витків, на другий — 40.
- Узявши електромагніт із більшим числом витків, складіть електричне коло за схемою на рис. 2.
- Замкніть коло та переконайтеся, що електромагніт притягує залізні ошурки, тобто виявляє магнітні властивості.
- За допомогою магнітної стрілки або компаса визначте полюси одержаного електромагніта. Опишіть, як ви це зробили.
- З'ясуйте, від чого залежить магнітна дія електромагніта.
  - 1) Використавши реостат, в обмотці електромагніта з більшим числом витків установіть силу струму спочатку 0,5 А, а потім 1,5 А. Порівняйте магнітну дію електромагніта за різної сили струму в обмотці.
  - 2) Вийміть стрижень з обмотки та встановіть в обмотці силу струму 1,5 А. З'ясуйте, як впливає наявність осердя на магнітну дію електромагніта.
  - 3) Складіть електричне коло (див. рис. 2) з електромагнітом, який має менше витків. За допомогою реостата встановіть у колі струм силою 1,5 А. Визначте, як зменшення числа витків впливає на магнітну дію електромагніта.

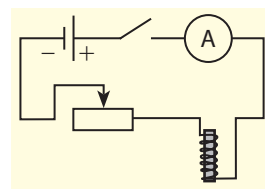


Рис. 2

### □ Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Зробіть висновок, у якому зазначте, як залежить магнітна дія електромагніта від сили струму, кількості витків в обмотці, наявності залізного осердя.

### + Творче завдання

Як можна намотати обмотку електромагніта таким чином, щоб у разі підключення до нього джерела струму на обох кінцях електромагніта утворилися південні полюси? Перевірте своє припущення експериментально.

## § 7. ЕЛЕКТРОДВИГУНИ. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ГУЧНОМОВЕЦЬ

Фізичні дослідження, які часто проводять заради «наукової цікавості», в разі вдалого завершення можуть започаткувати новий етап у розвитку техніки. Саме так сталося з вивченням електромагнітних явищ. Якось, розмовляючи з *Майклом Фарадеєм*, один державний діяч запитав у нього: «Як ви гадаєте, чи дасть якусь користь електрика?» Фарадей посміхнувся: «Через кілька років ви обкладатимете електрику податком!» Минув час, і зараз наше життя неможливо уявити, наприклад, без електричних двигунів — екологічно чистих, зручних, компактних пристроїв. Про те, як працюють деякі електричні пристрої, ви дізнаєтеся з цього параграфа.

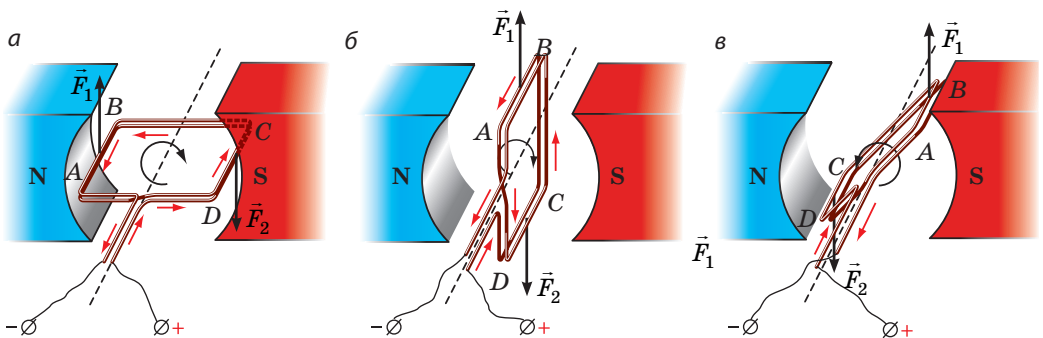
### 1 Вивчаємо дію магнітного поля на рамку зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку, що складається з кількох витків ізоляваного дроту, і помістимо її між полюсами магніту так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі.

Пропустимо в рамці електричний струм (рис. 7.1, а). Рамка повернеться і, гойднувшись кілька разів, розташується так, як показано на рис. 7.1, б. Це положення є положенням рівноваги рамки.

З'ясуємо, чому рамка починає рух. Для цього, скориставшись правилом лівої руки, визначимо напрямок сили Ампера, що діє на кожну сторону рамки на початку спостереження. На рис. 7.1, а бачимо, що сила Ампера  $\vec{F}_1$ , яка діє на сторону  $AB$ , напрямлена вгору, а сила Ампера  $\vec{F}_2$ , яка діє на сторону  $CD$ , напрямлена вниз. Отже, обидві сили повертають рамку за ходом годинникової стрілки.

А тепер з'ясуємо, чому рамка припинила рух. Річ у тім, що після проходження рамкою положення рівноваги сили Ампера повертатимуть її вже проти ходу годинникової стрілки (рис. 7.1, в). У результаті рамка почне повертатись у зворотному напрямку, пройде положення рівноваги та знову змінить напрямок руху. Урешті-решт через дію сил тертя рамка зупиниться.



**Рис. 7.1.** Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом (напрямок струму позначено червоними стрілками):

- а — сили Ампера ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) повертають рамку  $ABCD$  за ходом годинникової стрілки;
- б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують;
- в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

? Скориставшись правилом лівої руки, переконайтеся в тому, що для кожного з положень рамки, зображених на рис. 7.1, сила  $\vec{F}_1$ , яка діє на сторону  $AB$  рамки, напрямлена вгору, а сила  $\vec{F}_2$ , яка діє на сторону  $CD$  рамки, — вниз.

## 2 Дізнаємось, як працює двигун постійного струму

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі було використано у створенні *електричних двигунів*.

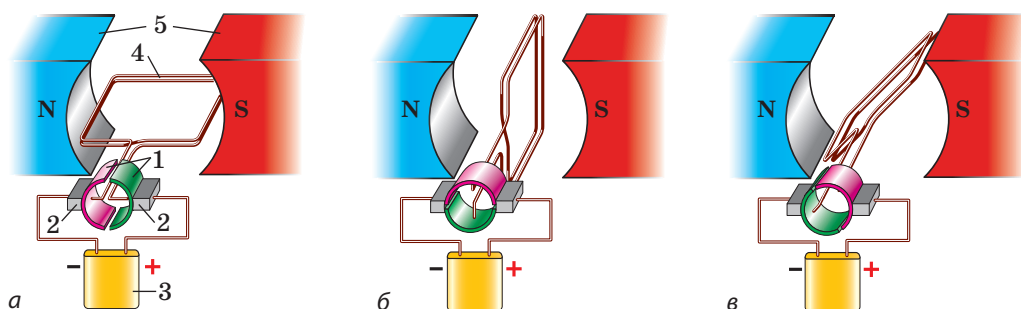
**Електричний двигун** — це пристрій, у якому електрична енергія перетворюється на механічну.

Щоб зрозуміти, як працює електродвигун постійного струму, з'ясуємо, як змусити рамку безперервно обертатися в одному напрямку. Неважко здогадатися: треба, щоб у момент проходження рамкою положення рівноваги напрямок струму в рамці змінювався на протилежний.

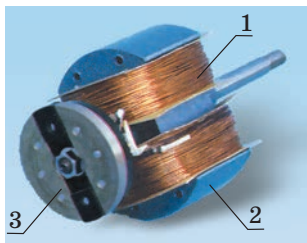
Пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці, називають **колектором**.

На рис. 7.2 зображено модель, за допомогою якої можна ознайомитися з принципом дії колектора. Власне колектор являє собою два півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2). Півкільця виготовлені з провідника й розділені проміжком. Щітки слугують для підведення напруги від джерела струму (3) до рамки (4), яка легко обертається навколо горизонтальної осі й розташована між полюсами потужного магніту (5). Одну щітку з'єднують з позитивним полюсом джерела струму, другу — з негативним.

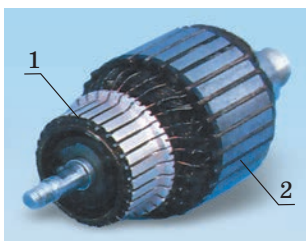
Після замикання кола рамка внаслідок дії сил Ампера починає повертатися за ходом годинникової стрілки (рис. 7.2, а). Півкільця колектора повертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги (рис. 7.2, б) до щіток будуть притиснуті вже інші півкільця (рис. 7.2, в). Напрямок струму в рамці зміниться на протилежний, а напрямок її обертання не зміниться — рамка продовжить рух за ходом годинникової стрілки.



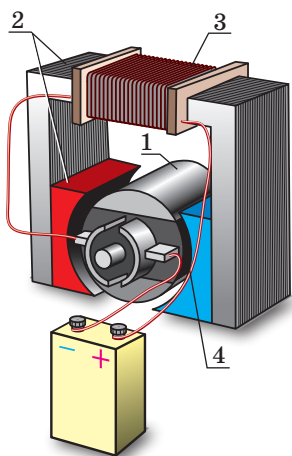
**Рис. 7.2.** Модель, яка демонструє принцип дії колектора (а). Після проходження положення рівноваги (б) щітки колектора притиснуті вже до інших півкілець (в), тому напрямок струму в рамці змінюється на протилежний



**Рис. 7.3.** Ротор двигуна, який містить одну обмотку: 1 — обмотка; 2 — осердя; 3 — півкільця



**Рис. 7.4.** Ротор двигуна, який містить дванадцять обмоток: 1 — пластини колектора, 2 — осердя з обмоткою



**Рис. 7.5.** Модель електродвигуна постійного струму: 1 — ротор; 2 — статор; 3 — обмотка статора; 4 — колектор

**?** Визначте для положень *a* і *в* рамки (див. рис. 7.2) напрямки сил Ампера, що діють на сторони рамки. Доведіть, що в обох випадках сили Ампера обертають рамку за ходом годинникової стрілки.

Таким чином, щоб виготовити електричний двигун, потрібно мати: 1) постійний магніт або електромагніт; 2) провідну рамку; 3) джерело струму; 4) колектор.

### **3** Збільшуємо потужність електричного двигуна

Сили Ампера, які забезпечують обертання рамки, прямо пропорційні довжині провідника. Тому для збільшення потужності електродвигуна його обмотку виготовляють із великої кількості витків дроту. Витки вкладають у спеціальні пази на бічній поверхні осердя — циліндра, виготовленого з листів магнітом'якої сталі. Осердя з обмоткою разом із півкільцями колектора утворюють **ротор** (від латин. *rotare* — обертатися) двигуна (рис. 7.3).

Для забезпечення рівномірного обертання ротора використовують кілька обмоток, які намотують на одне осердя. Колектор такого двигуна має не два півкільця, а низку мідних дугоподібних пластин, закріплених на ізолюваному барабані (рис. 7.4).

У більшості сучасних електродвигунів замість постійного магніту використовують електромагніт, який становить одне ціле з корпусом електродвигуна та слугує **статором** (нерухомою частиною пристрою; від латин. *stator* — той, що стоїть нерухомо). Обмотка статора підключена до того самого джерела струму, що й обмотка ротора. Коли в обмотках ротора й статора йде струм, ротор обертається в магнітному полі статора і двигун працює (рис. 7.5).

Електродвигуни постійного струму застосовують в електротранспорті — трамваях, тролейбусах, електровозах, електромобілях, використовують як стартери для запуску двигунів внутрішнього згоряння. У промисловості та побуті частіше застосовують електродвигуни змінного струму.

Електричні двигуни мають істотні переваги перед тепловими. Електродвигуни більш компактні, економічні (їхній ККД сягає 98 %), зручні в застосуванні (їхню потужність легко регулювати), не забруднюють довкілля.

#### 4 Знайомимося з принципом дії електровимірювальних приладів

На повертанні рамки зі струмом у магнітному полі постійного магніту ґрунтується дія електровимірювальних приладів *магнітоелектричної системи* — гальванометрів, амперметрів і вольтметрів постійного струму.

Вимірювальний механізм таких приладів зображено на [рис. 7.6](#).

Коли струм у рамці (4) відсутній, спіральні пружини (2) утримують півосі (3), а отже, й стрілку (6) таким чином, що кінець стрілки встановлюється на нульовій позначці шкали приладу (7). Коли прилад вмикають у коло, в рамці починає йти струм і внаслідок дії сил Ампера рамка повертається в магнітному полі постійного магніту (1). Разом із рамкою повертаються півосі, а отже, і стрілка.

Під час повертання рамки закручуються пружини й виникають додаткові сили пружності. Коли момент сил пружності зрівноважує момент сил Ампера, повертання припиняється, а стрілка залишається відхиленою. Чим більша сила струму в рамці, тим на більший кут відхилиться стрілка і тим більшими будуть покази приладу.

Прилади магнітоелектричної системи мають велику точність і високу чутливість.

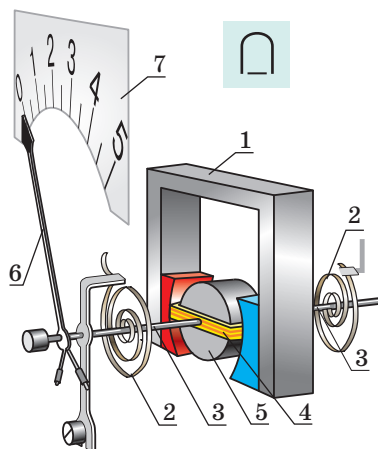
#### 5 Зіставляємо амперметр і вольтметр

За внутрішньою будовою амперметр і вольтметр є однаковими; відрізняються лише їхні шкали й електричні опори. Амперметр вмикають у коло послідовно, тому його опір має бути якнайменшим, інакше сила струму в колі значно зменшиться. А от вольтметр приєднують до кола паралельно з пристроєм, на якому вимірюють напругу, отже, щоб сила струму в колі майже не змінювалась, опір вольтметра має бути якнайбільшим.

#### 6 Знайомимося з принципом дії електродинамічного гучномовця

**Електродинамічний гучномовець (динамік)** — це пристрій, який перетворює електричний сигнал на чутний звук.

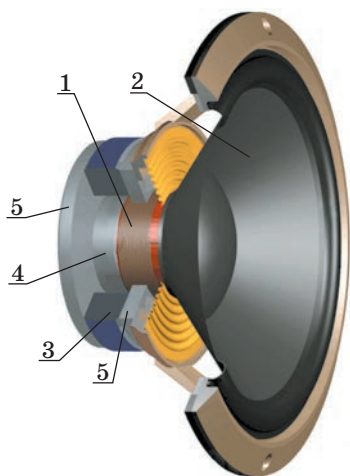
Звук випромінюють тіла, які коливаються із частотою від 20 до 20 000 Гц (тобто здійснюють від 20 до 20 000 коливань за секунду)\*. Коливне тіло в динаміку — *дифузор*. Щоб зрозуміти, як змусити дифузор коліватися за допомогою струму, розглянемо будову динаміка ([рис. 7.7](#)).



**Рис. 7.6.** Схема вимірювального механізму приладів магнітоелектричної системи:

- 1 — постійний нерухомий магніт; 2 — спіральні пружини; 3 — півосі; 4 — рамка, жорстко закріплена на півосях; 5 — нерухоме осердя; 6 — стрілка; 7 — шкала

\* Детальніше про звук ви дізнаєтесь із розділу III підручника.



**Рис. 7.7.** Будова електродинамічного гучномовця: 1 — звукова котушка; 2 — дифузор; 3 — постійний кільцевий магніт; 4 — керн; 5 — фланці

Основні частини динаміка — *котушка зі струмом* (звукова котушка) (1), до якої прикріплений дифузор (2), і *магнітна система*, що складається із постійного кільцевого магніту (3), сталевого циліндра (керн) (4) і двох сталевих дисків (фланців) (5), які щільно прилягають до магніту. Магнітна система створює магнітне поле, напрямлене перпендикулярно до витків котушки.

Якщо котушкою тече струм, на витки котушки діють сили Ампера, що змушують котушку рухатися вздовж керн, — котушка втягується в зазор кільцевого магніту. Коли сила струму в котушці змінюється зі звуковою частотою, так само змінюються й сили Ампера, й котушка то сильніше, то слабше втягується в зазор (коливається в такт зміни сили струму). Разом із котушкою коливається і прикріплений до неї дифузор, який «штовхає» повітря, створюючи звукову хвилю, — гучномовець випромінює звук.



### Підбиваємо підсумки

Унаслідок дії сил Ампера рамка зі струмом може обертатися в магнітному полі. Це явище використовують у роботі електродвигунів. Щоб забезпечити обертання рамки в одному напрямку, застосовують колектор — пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці.

Гальванометри, амперметри і вольтметри — це вимірювальні прилади магнітоелектричної системи. Їхня дія ґрунтується на повертанні рамки зі струмом у магнітному полі постійного магніту.

Ще одним прикладом застосування сил Ампера є електродинамічний гучномовець, дія якого ґрунтується на втягуванні котушки зі струмом у магнітне поле кільцевого магніту.



### Контрольні запитання

1. Чому рамка зі струмом повертається в магнітному полі? чому зупиняється?
2. Назвіть основні частини електродвигуна. Яка з них «відповідає» за безперервне обертання ротора електродвигуна?
3. Що являє собою статор електродвигуна?
4. Назвіть переваги електричних двигунів порівняно з тепловими.
5. Опишіть будову та принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи.
6. Чи відрізняються будова та принцип дії амперметрів і вольтметрів? Якщо так, то чим?
7. Опишіть будову та принцип дії гучномовця.



### Вправа № 7

1. На рис. 1 зображено рамку зі струмом, яка повертається в магнітному полі постійного магніту. Визначте напрямок струму в рамці.



Рис. 1



2. Чому в разі послідовного приєднання вольтметра до кола сила струму в колі значно зменшується?
3. На затискачах вимірвальних приладів магнітоелектричної системи зазначено полярність («+» і «-»). Що буде, якщо, вмикаючи прилад, не дотриматися полярності?
4. Електричні двигуни мають низку переваг перед тепловими. Чому ж людство не відмовляється від застосування теплових двигунів?
5. Окрім електровимірвальних приладів магнітоелектричної системи існують вимірвальні прилади електродинамічної та електромагнітної систем. У вимірвальних приладах *електродинамічної системи* (рис. 2) замість постійного магніту використовують електромагніт. Дія вимірвальних приладів *електромагнітної системи* (рис. 3) базується на явищі втягування феромагнітного диска в проміжок нерухокої котушки зі струмом. Розгляньте рис. 2 і 3 та спробуйте пояснити, як працюють подані прилади. Якщо треба, зверніться до додаткових джерел інформації.
6. Згадайте, що таке електричний струм. Дайте його означення. За яких умов він виникає?

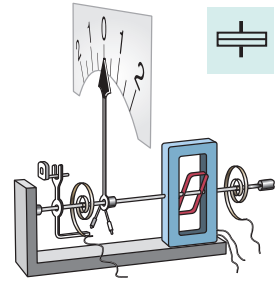


Рис. 2

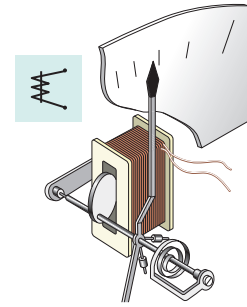


Рис. 3



### Експериментальне завдання

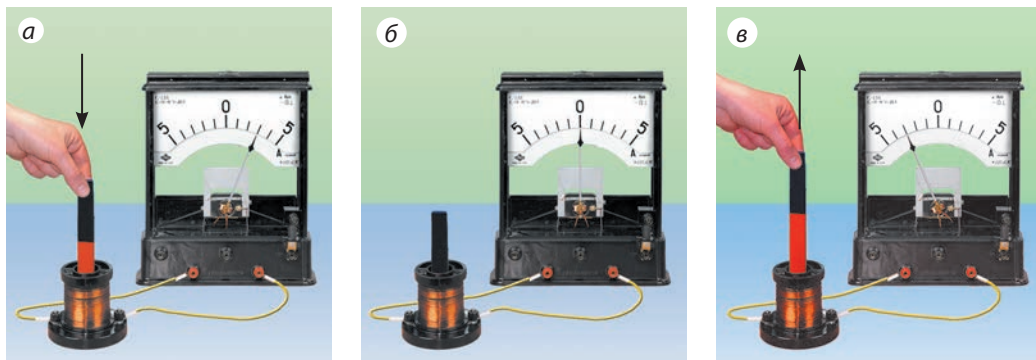
«Ламайстер». Розгляньте будову електричного двигуна, вийнятого з іграшки. Приєднайте двигун до батареї гальванічних елементів і зверніть увагу на напрямок обертання ротора. Яким чином можна змінити напрямок обертання ротора на протилежний? Перевірте своє припущення.

## § 8. ДОСЛІДИ ФАРАДЕЯ. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. ІНДУКЦІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Досліди Г. Ерстеда та А. Ампера (див. § 1) показали, що електричний струм створює магнітне поле. А чи можна зробити навпаки, тобто за допомогою магнітного поля отримати електричний струм? 29 серпня 1831 р. після понад 16 тисяч дослідів англійський фізик і хімік Майкл Фарадей одержав електричний струм за допомогою магнітного поля постійного магніту. У чому полягали досліди Фарадея та яке значення мало його відкриття?

### 1 Повторюємо досліди Фарадея

Візьмемо котушку, замкнемо її на гальванометр і будемо вводити в котушку постійний магніт. Під час руху магніту стрілка гальванометра відхилиться — це свідчить про наявність електричного струму (рис. 8.1, а).

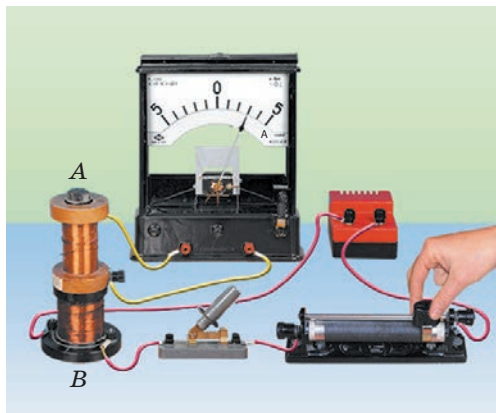


**Рис. 8.1.** Виникнення струму в котушці фіксується гальванометром: *а* — якщо магніт уводити в котушку, стрілка гальванометра відхиляється праворуч; *б* — якщо магніт нерухомий, струм не виникає і стрілка не відхиляється; *в* — якщо виводити магніт із котушки, стрілка гальванометра відхиляється ліворуч

Чим швидше рухати магніт, тим сильнішим буде струм; якщо рух магніту припинити, припиниться й струм — стрілка повернеться на нульову позначку (рис. 8.1, *б*). Виймаючи магніт із котушки, бачимо, що стрілка гальванометра відхиляється в інший бік (рис. 8.1, *в*), а після припинення руху магніту знову повертається на нульову позначку.

Якщо залишити магніт нерухомим, а рухати котушку (або наближаючи її до магніту, або віддаляючи від нього, або повертаючи поблизу полюса магніту), то також спостерігатимемо відхилення стрілки гальванометра.

Тепер візьмемо дві котушки — *A* і *B* — і надінемо їх на спільне осердя (рис. 8.2). Котушку *B* через реостат приєднаємо до джерела струму, а котушку *A* замкнемо на гальванометр. Якщо пересувати повзунок реостата, то в котушці *A* буде йти електричний струм. Струм виникатиме як під час збільшення, так і під час зменшення сили струму в котушці *B*. А от напрямок струму буде різним: у разі збільшення сили струму стрілка гальванометра відхилитиметься в один бік, а в разі зменшення — в інший. Струм у котушці *A* виникатиме також у момент замикання та в момент розмикання кола котушки *B*.



**Рис. 8.2.** Якщо розімкнути чи замкнути коло котушки *B* або змінити в ній силу струму, в котушці *A* виникне струм

**?** Як ви вважаєте, чи виникатиме струм у котушці *A* (див. рис. 8.2), якщо її рухати відносно котушки *B*?

Усі розглянуті досліди — це сучасний варіант тих, які протягом 10 років здійснював Майкл Фарадей і завдяки яким він дійшов висновку: *у замкненому провідному контурі*

виникає електричний струм, якщо кількість ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром, змінюється.

Це явище було названо **електромагнітною індукцією**, а електричний струм, який при цьому виникає, — **індукційним** (наведеним) **струмом** (рис. 8.3).

**?** Чи виникне в замкненій провідній рамці індукційний струм, якщо рамку поступально (не повертаючи) пересувати між полюсами електромагніта (рис. 8.4)?

## 2 З'ясуємо причини виникнення індукційного струму

Ви з'ясували, коли в замкненому провідному контурі виникає індукційний струм. А що ж є причиною його виникнення? Розглянемо два випадки.

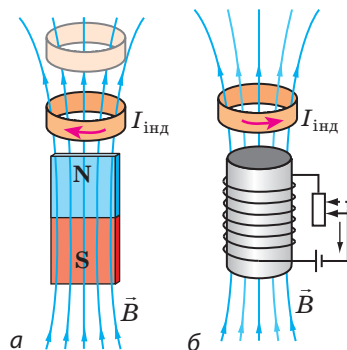
1. *Провідний контур рухається в магнітному полі (рис. 8.3, а).* Якщо провідник рухається в магнітному полі, то вільні заряджені частинки всередині провідника рухаються разом із ним у певному напрямку. На рухомі заряджені частинки магнітне поле діє із певною силою. Саме під дією цієї сили заряджені частинки починають напрямлено рухатися вздовж провідника — в провіднику виникає індукційний електричний струм.

2. *Нерухомий провідний контур розташований у змінному магнітному полі (рис. 8.3, б).* У цьому випадку сили, що діють з боку магнітного поля, не можуть зробити хаотичний рух заряджених частинок всередині провідника напрямленим. Чому ж у контурі виникає індукційний струм? Річ у тім, що змінне магнітне поле завжди супроводжується появою в навколишньому просторі вихрового електричного поля (силові лінії такого поля є замкненими).

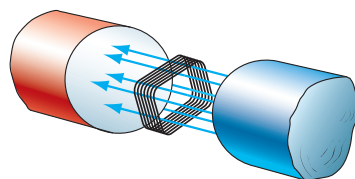
Саме електричне поле, а не магнітне, діє на вільні заряджені частинки в провіднику та надає їм напрямленого руху, створюючи таким чином індукційний струм.

## 3 Визначаємо напрямок індукційного струму

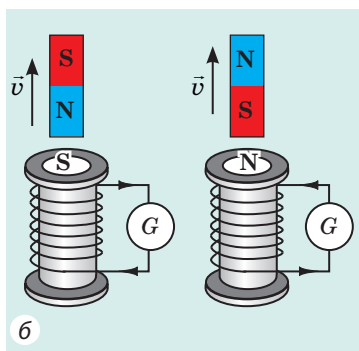
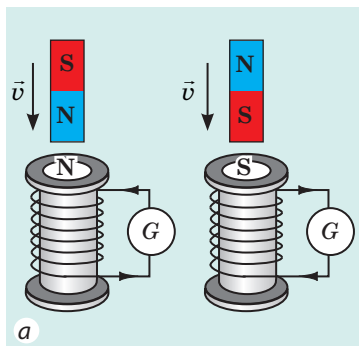
Для визначення напрямку індукційного струму скористаємося замкненою котушкою. Якщо змінювати магнітне поле, що пронизує котушку (наприклад, наближати або віддаляти магніт), то в котушці виникає індукційний струм. Унаслідок цього котушка сама стає магнітом. Досліди свідчать: 1) якщо магніт наближати до котушки, то котушка буде відштовхуватися від магніту; 2) якщо магніт віддаляти від котушки, то котушка притягуватиметься до магніту.



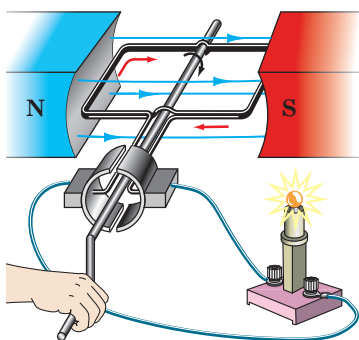
**Рис. 8.3.** Виникнення індукційного струму внаслідок зміни кількості ліній магнітної індукції, що пронизують контур: а — контур наближають до магніту; б — послаблюють магнітне поле, в якому розташований контур



**Рис. 8.4.** До завдання в § 8



**Рис. 8.5.** Напрямок індукційного струму в замкненій котушці: а — магніт наближають до котушки; б — магніт віддаляють від котушки



**Рис. 8.6.** Під час обертання рамки в магнітному полі в рамці виникає індукційний струм

Це означає:

1) якщо кількість ліній магнітної індукції, що пронизують котушку, збільшується (магнітне поле всередині котушки посилюється), то в ній виникає індукційний струм такого напрямку, що котушка буде обернена до магніту однойменним полюсом (рис. 8.5, а).

2) якщо кількість ліній магнітної індукції, що пронизують котушку, зменшується, то в котушці виникає індукційний струм такого напрямку, що котушка буде обернена до магніту різнойменним полюсом (рис. 8.5, б).

Знаючи полюси котушки та скориставшись правою рукою (див. § 3), можна визначити напрямок індукційного струму. Аналогічно можна визначити напрямок індукційного струму для випадку, коли дві котушки надіто на спільне осердя (див. пункт 5 «Учимося розв'язувати задачі» § 8).

#### 4 Знайомимося з промисловими джерелами електричної енергії

Явище електромагнітної індукції використовують в електромеханічних генераторах, без яких неможливо уявити сучасну електроенергетику.

**Електромеханічний генератор** — пристрій, в якому механічна енергія перетворюється на електричну.

Щоб зрозуміти принцип дії електромеханічного генератора, звернемося до досліду. Візьмемо рамку, що складається з кількох витків дроту, й будемо обертати її в магнітному полі постійного магніту (рис. 8.6). Під час обертання рамки кількість магнітних ліній, що її пронизують, то збільшується, то зменшується. У рамці виникає електричний струм, наявність якого доводить світіння лампи.

Промислові генератори електричного струму мають практично ту саму будову, що й електродвигуни. Проте за принципом дії генератор — це електричний двигун «навпаки». Генератор, як і електродвигун, складається зі статора і ротора (рис. 8.7). Масивний нерухомий *статор* (1) являє собою порожнистий циліндр, на внутрішній поверхні якого розміщено

товстий мідний ізольований дріт — *обмотку статора* (2). У середині статора обертається *ротор* (3). Він, як і ротор електродвигуна, зазвичай являє собою великий циліндр, у пази якого вкладено *обмотку ротора* (4). До обмотки ротора подається напруга від джерела постійного струму.

Струм тече по обмотці ротора, створюючи навколо нього магнітне поле, яке пронизує обмотку статора.

Під дією пари (на теплових і атомних електростанціях) або води, що падає з висоти (на гідроелектростанціях), ротор генератора починає швидко обертатися. Унаслідок цього кількість ліній магнітної індукції, що пронизують витки обмотки статора, змінюється і в обмотці статора виникає індукційний електричний струм. Після низки перетворень цей струм подають до споживача електричної енергії.

## 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Котушка й алюмінієве кільце розміщені на спільному осерді (рис. 1). Визначте напрямок індукційного струму в кільці, якщо ключ замкнути. Як буде поводитися кільце в момент замикання ключа? через деякий час після замикання ключа? в момент розмикання ключа?

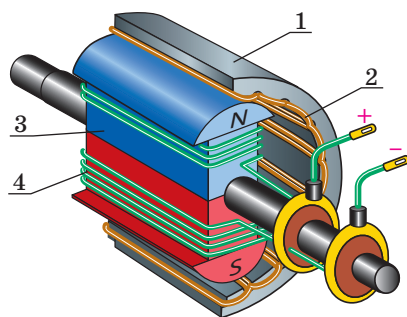
*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

1) Струм у котушці напрямлений по її передній стінці вгору (від «+» до «-»). Скориставшись правою рукою, визначимо полюси котушки (напрямок магнітних ліній всередині котушки): ближчим до кільця буде південний полюс котушки (рис. 2).

2) У момент замикання ключа сила струму в котушці збільшується, тому магнітне поле всередині кільця посилюється.

3) У кільці виникає індукційний струм такого напрямку, що кільце буде обернене до котушки однойменним полюсом (південним) і відштовхнеться від неї.

4) Скориставшись правою рукою, визначимо напрямок індукційного струму в кільці (він буде протилежним напрямку струму в котушці).



**Рис. 8.7.** Схема будови електрогенератора:

1 — статор; 2 — обмотка статора;  
3 — ротор; 4 — обмотка ротора

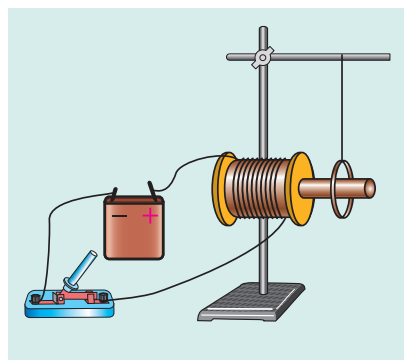


Рис. 1

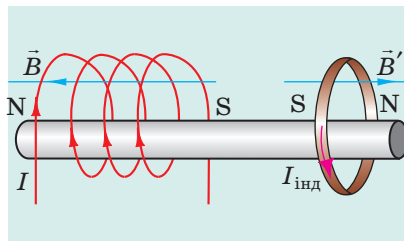


Рис. 2

### Алгоритм визначення напрямку індукційного струму

1. Визначаємо напрямок магнітної індукції зовнішнього магнітного поля ( $\vec{B}$ ).
2. З'ясуємо, посилюється чи послаблюється зовнішнє магнітне поле (тобто збільшується чи зменшується кількість ліній магнітної індукції, що пронизують контур).
3. Визначаємо напрямок магнітної індукції магнітного поля, створеного індукційним струмом ( $\vec{B}'$ ).
4. Визначаємо напрямок індукційного струму.

Майже відразу після замикання ключа струм в котушці буде постійним, магнітне поле всередині кільця не змінюватиметься й індукційного струму в кільці не буде. Оскільки кільце виготовлене із магнітослабого матеріалу, воно майже не буде взаємодіяти з котушкою.

У момент розмикання ключа сила струму в котушці швидко зменшується, створене котушкою магнітне поле послаблюється. У кільці виникає індукційний струм такого напрямку, що кільце буде обернене до котушки різноіменними полюсом і на короткий час притягнеться до неї (рис. 3).

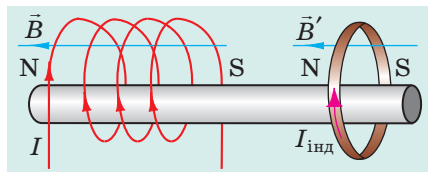


Рис. 3



### Підбиваємо підсумки

У замкненому провідному контурі в разі зміни кількості ліній магнітної індукції, що пронизують контур, виникає електричний струм. Такий струм називають індукційним, а явище виникнення струму — електромагнітною індукцією.

Одна з причин виникнення індукційного струму полягає в тому, що змінне магнітне поле завжди супроводжується виникненням у навколишньому просторі електричного поля. Електричне поле діє на вільні заряджені частинки в провіднику, і ті починають рухатися напрямлено — виникає індукційний струм.



### Контрольні запитання

1. Опишіть досліди М. Фарадея.
2. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
3. Який струм називають індукційним?
4. Якими є причини виникнення індукційного струму?
5. Робота яких пристроїв ґрунтується на явищі електромагнітної індукції? Які перетворення енергії в них відбуваються?
6. Опишіть будову та принцип дії генераторів електричного струму.



### Вправа № 8

1. Дві нерухомі котушки розташовані так, як показано на рис. 1. Міліамперметр, підключений до однієї з котушок, реєструє наявність струму. За якої умови це можливо?
2. На рис. 2 зображено пристрій, який називають «кільця Ленца». Пристрій складається з двох алюмінієвих кілець (суцільного і розрізаного),

закріплених на алюмінієвому коромислі, яке має можливість легко обертатися навколо вертикальної осі.

1) Як буде поводитися суцільне кільце пристрою, якщо:

а) підносити до нього магніт? б) відсувати від нього магніт? в) підносити до нього магніт південним полюсом?

2) Для кожного випадку в п. 1 визначте напрямок індукційного струму в суцільному кільці та напрямок індукції магнітного поля, створеного цим струмом.

3) Що відбуватиметься, якщо магніт підносити до розрізаного алюмінієвого кільця?

3. Дві котушки надіто на спільне осердя (рис. 3). Визначте напрямок індукційного струму в котушці А, якщо: 1) замкнути коло; 2) розімкнути коло; 3) пересунути повзунок реостата ліворуч; 4) пересунути повзунок реостата праворуч.

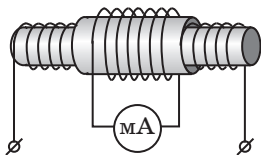


Рис. 1

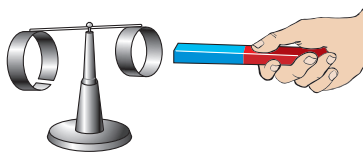


Рис. 2

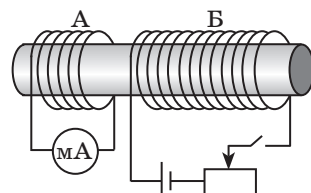


Рис. 3

4. Складіть задачу, обернену до розглянутої в пункті 5 § 8. Розв'яжіть отриману задачу.

## i

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

**Тема.** Спостереження явища електромагнітної індукції.

**Мета:** дослідити умови виникнення індукційного струму в замкненій котушці; з'ясувати чинники, від яких залежать сила та напрямок індукційного струму.

**Обладнання:** міліамперметр, два штабові або підковоподібні магніти, дротяна котушка-моток на каркасі.



## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

## II

## Підготовка до експерименту

- Перед виконанням роботи згадайте:
  - вимоги безпеки під час роботи з електричними колами;
  - правила, яких необхідно дотримуватися під час вимірювання сили струму амперметром;
  - як залежить сила індукційного струму від швидкості зміни магнітного поля;
  - від чого залежить напрямок індукційного струму.

2. Виконайте завдання. На рис. 1–4 зображено штабовий магніт, котушку-моток (далі — котушка), приєднану до міліамперметра, та зазначено напрямок швидкості руху магніту. Перенесіть рисунки до зошита й для кожного випадку:

- 1) позначте магнітні полюси котушки;
- 2) визначте та покажіть напрямок індукційного струму в котушці.

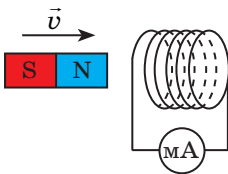


Рис. 1

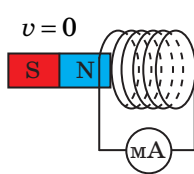


Рис. 2

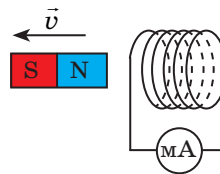


Рис. 3

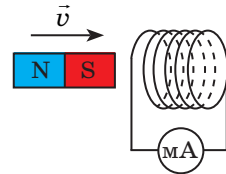


Рис. 4

3. Складіть електричне коло, приєднавши проводи котушки до клем міліамперметра.
4. На одному з торців котушки поставте маркером мітку.

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника).*

### ▶ Експеримент 1

*З'ясування умов виникнення індукційного струму в замкненому провіднику та чинників, від яких залежить напрямок індукційного струму.*

Утримуючи котушку та магніт у руках, послідовно виконайте досліди, зазначені в табл. 1.

*Зверніть увагу!* Магніт слід вводити в котушку та виводити з неї тільки з боку того торця котушки, на якому поставлено мітку.

Таблиця 1

Номер досліду	Дії з магнітом і котушкою	Як поводить себе стрілка міліамперметра (відхиляється ліворуч, праворуч, не відхиляється)
1	Уводимо магніт у котушку північним полюсом	
2	Залишаємо магніт нерухомим	
3	Виводимо магніт із котушки	
4	Уводимо магніт у котушку південним полюсом	
5	Залишаємо магніт нерухомим	
6	Виводимо магніт із котушки	
7	Наближаємо котушку до південного полюса магніту	
8	Наближаємо котушку до північного полюса магніту	



### Аналіз результатів експерименту 1

Проаналізуйте табл. 1 і сформулюйте висновок, у якому зазначте:

- 1) за яких умов у замкненій котушці виникає індукційний струм;
- 2) як змінюється напрямок індукційного струму в разі зміни напрямку руху магніту;
- 3) як змінюється напрямок індукційного струму в разі зміни полюса магніту, який наближають або віддаляють від котушки.

### Експеримент 2

*З'ясування чинників, від яких залежить значення індукційного струму.*

Утримуючи котушку та магніт у руках, послідовно виконайте досліди, зазначені в табл. 2. Щоразу знімайте покази міліамперметра та заносьте їх до табл. 2.

Таблиця 2

Номер досліджу	Дії з магнітом і котушкою	Сила струму $I$ , мА
1	Швидко вводимо магніт у котушку	
2	Повільно вводимо магніт у котушку	
3	Швидко вводимо в котушку два магніти, складені однойменними полюсами	
4	Повільно вводимо в котушку два магніти, складені однойменними полюсами	

### Аналіз результатів експерименту 2

Проаналізуйте табл. 2 і сформулюйте висновок, у якому зазначте:

- 1) як залежить сила індукційного струму від швидкості відносного руху магніту та котушки;
- 2) як залежить сила індукційного струму від значення індукції зовнішнього магнітного поля, зміна якого спричиняє появу струму в котушці.

### + Творче завдання

Продумайте та запишіть план проведення експериментів із дослідження умов виникнення індукційного струму в замкненій котушці для випадків, коли дві котушки надіто на спільне осердя (див. рис. 5–7). За можливості проведіть експерименти. Сформулюйте висновки. Для зазначених випадків укажіть полюси кожної котушки та напрямки струму в них.

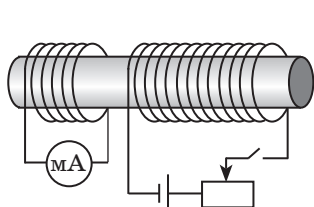


Рис. 5

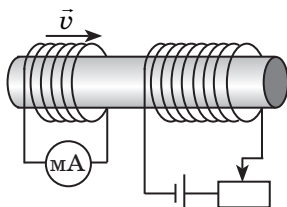


Рис. 6

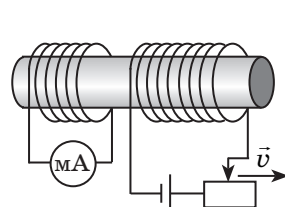


Рис. 7

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ I «Магнітне поле»

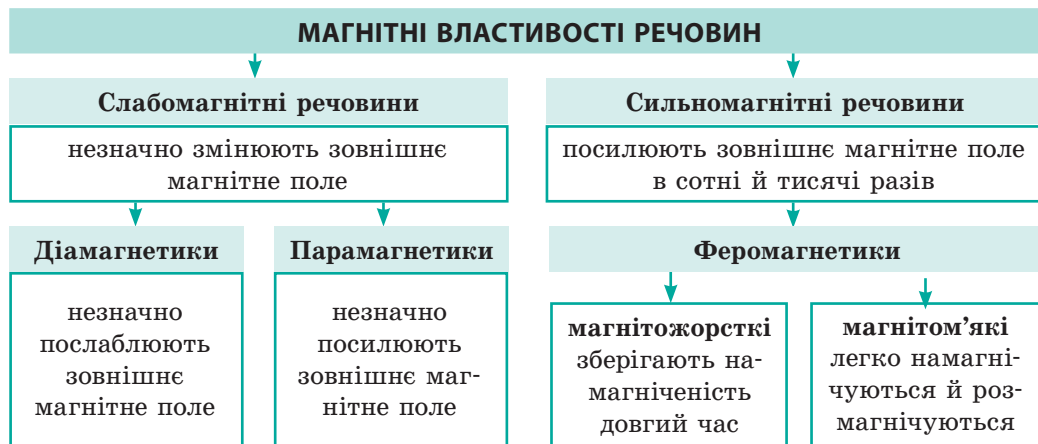
1. Вивчаючи розділ I, ви дізналися, що спочатку людина дізналася про *постійні магніти* та почала їх використовувати; значно пізніше було створено *електромагніти*, які знайшли широке застосування.



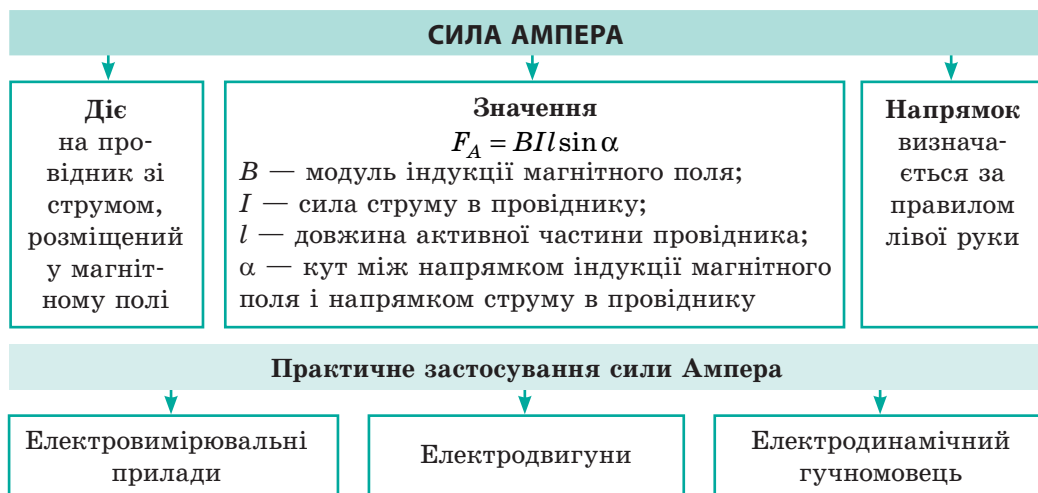
2. Ви з'ясували, що *навколо намагніченого тіла, рухомої зарядженої частинки та провідника зі струмом існує магнітне поле*.



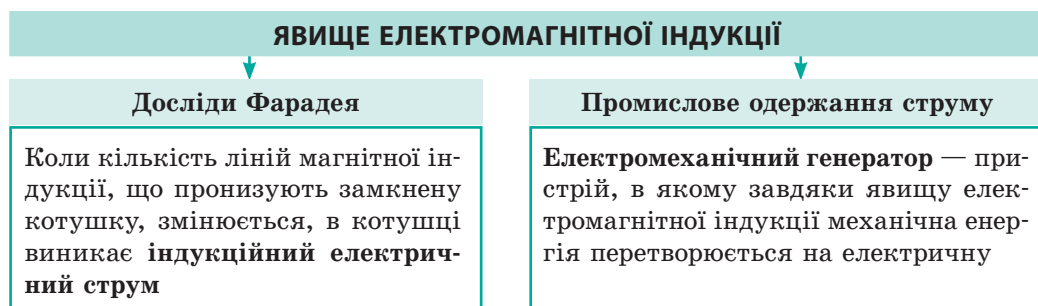
3. Ви дізналися, що в магнітному полі всі речовини намагнічуються, але по-різному.



4. Ви з'ясували, що на провідник зі струмом, розміщений у магнітному полі, діє певна сила, — *сила Ампера*.



5. Ви повторили досліди М. Фарадея та ознайомилися з явищем електромагнітної індукції.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I «Магнітне поле»

Завдання 1, 2, 5–7 містять тільки одну правильну відповідь.

- (1 бал) Південний магнітний полюс стрілки компаса зазвичай указує:
  - на північний географічний полюс Землі;
  - південний магнітний полюс Землі;
  - південний географічний полюс Землі;
  - екватор Землі.
- (1 бал) Магнітне поле котушки зі струмом слабшає, якщо:
  - у середину котушки ввести залізне осердя;
  - збільшити число витків в обмотці;
  - зменшити силу струму;
  - збільшити силу струму.
- (2 бали) Установіть відповідність між науковим фактом і дослідами, за допомогою яких цей факт було з'ясовано.
 

1 Навколо провідника зі струмом існує магнітне поле	А Досліди А. Ампера
2 Навколо планети Земля існує магнітне поле	Б Дослід В. Гільберта
3 Два провідники зі струмом взаємодіють	В Дослід Г. Ерстеда
4 Змінне магнітне поле створює електричне поле	Г Дослід Ш. Кулона
	Д Досліди М. Фарадея
- (2 бали) Виберіть усі правильні твердження.
  - Полюс магніту — це ділянка поверхні магніту, де магнітна дія виявляється найсильніше.
  - Лінії індукції однорідного магнітного поля можуть бути викривлені.
  - Одиниця магнітної індукції в СІ — тесла.
  - Ротор — це нерухома частина двигуна.
- (2 бали) У якому випадку (рис. 1) напрямок ліній індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом зазначено правильно?

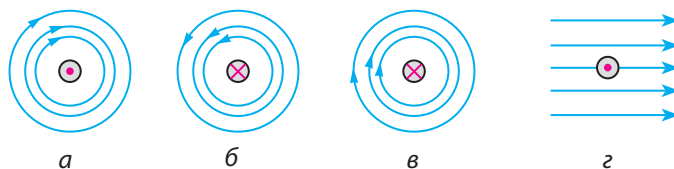


Рис. 1

- (2 бали) Де на рис. 2 напрямок сили Ампера зазначено правильно?

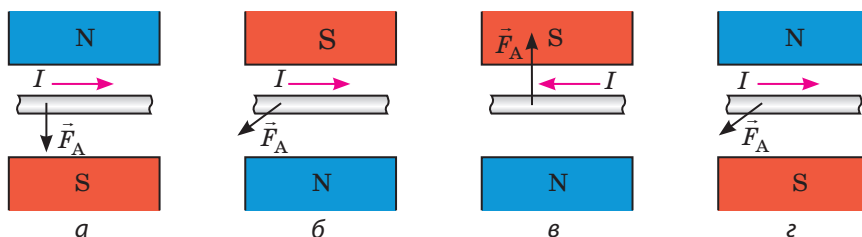


Рис. 2

7. (2 бали) Прямолінійний провідник завдовжки 0,6 м розташований в однорідному магнітному полі індукцією 1,2 мТл під кутом  $30^\circ$  до лінії магнітної індукції поля. Визначте силу Ампера, яка діє на провідник, якщо сила струму в ньому 5 А.  
а) 1,8 мН;      б) 2,5 мН;      в) 3,6 мН;      г) 10 мН.
8. (2 бали) Перед тим як подати зерно на жорна млина, це зерно пропускають між полюсами сильного електромагніта. Для чого це роблять?
9. (3 бали) Магнітна стрілка встановилася в магнітному полі котушки зі струмом так, як показано на рис. 3. Визначте полюси джерела струму.
10. (3 бали) На рис. 4 зображено рамку, що повертається в магнітному полі постійного магніту. Визначте полюси джерела струму, до якого підключено рамку.
11. (3 бали) На рис. 5 зображено провідник зі струмом, розташований у магнітному полі підковоподібного магніту. Визначте полюси магніту.

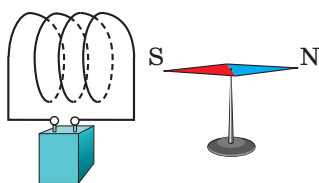


Рис. 3

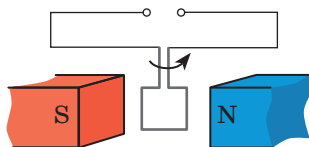


Рис. 4

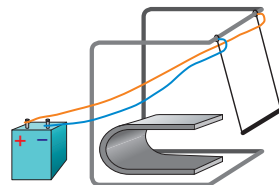


Рис. 5

12. (3 бали) Чи відхилиться магнітна стрілка від напрямку «північ — південь», якщо до неї піднести залізний брусок? мідний брусок?
13. (4 бали) Визначте полюси електромагніта (рис. 6). Як зміниться підіймальна сила електромагніта, якщо повзунок реостата пересунути ліворуч?
14. (4 бали) Визначте напрямок індукційного струму в замкненому провідному кільці в момент замикання ключа (рис. 7).
15. (4 бали) Сталевий стрижень завдовжки 40 см і масою 50 г лежить перпендикулярно до горизонтальних рейок (рис. 8). Уздовж рейок напрямлене однорідне магнітне поле індукцією 0,25 Тл. У стрижні пропускають електричний струм силою 2 А. З якою силою стрижень тисне на рейки?

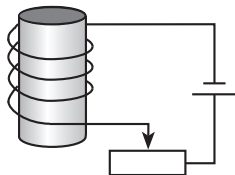


Рис. 6

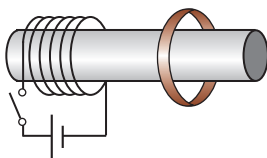


Рис. 7

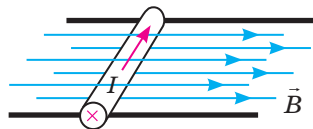


Рис. 8

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## Від зір до «летючих» жаб, або Навіщо потрібні надпотужні магніти

У більшості людей магніти асоціюються з компасом. Інженери згадують ще про їх застосування в електродвигунах і генераторах електричного струму. Але всі ці конструкції вже давно відомі. Отже, подальше вивчення магнітних явищ є зайвим?

Не поспішайте з відповіддю, згадайте, наприклад, про потяги «без тертя». Рейками для таких потягів є магнітне поле. Два магніти, один із яких розміщений в опорах, а другий — у самому потязі, повернені один до одного однойменними полюсами, а отже, відштовхуються. Як результат — потяг ніби «летить» над дорогою. Про переваги такого технічного рішення докладно було розказано на «Енциклопедичній сторінці» в підручнику для 7 класу.

Розглянемо ще кілька прикладів застосування *надпотужних магнітів*. Але спочатку визначимося, що називають надпотужними магнітами. Для цього порівняємо індукції магнітних полів, створюваних різними об'єктами, за таблицею, в якій наведено, у скільки разів індукція  $B$  магнітного поля певного об'єкта відрізняється від індукції  $B_3$  магнітного поля Землі. Магнітне поле Землі, порівняно невелике, іноді є шкідливим, і вчені навчилися екранувати його (знижувати) в спеціально обладнаних приміщеннях — *магнітоекранованих кімнатах*. Найменше значення магнітного поля в такій кімнаті є у 10 мільйонів разів меншим, ніж поле Землі.

Як бачимо з таблиці, створено магніт, індукція магнітного поля якого сильніше за індукцію магнітного поля Землі у 200 000 разів. Для чого потрібні такі потужні магніти?

Насамперед фізикам потрібні потужні магніти для утримання пучків заряджених частинок у прискорювачах. На рис. 1 зображено один із найбільших у світі прискорювачів. По гігантському кільцю діаметром кілька



**Рис. 1.** Один із найбільших у світі прискорювачів заряджених частинок



**Рис. 2.** Надпотужні магніти, які утримують заряджені частинки всередині прискорювача

Джерело або ділянка, де вимірюється індукція магнітного поля	$\left( \frac{B}{B_3} \right)$
Поверхня Землі	1
Магнітоекранована кімната	$10^{-6}$
Шкільний лабораторний магніт	200
Середина сонячної плями	3000
Великий електромагніт	30 000
Надпотужний лабораторний магніт	200 000
Поверхня нейтронної зорі	$10^{12}$

кілометрів рухаються заряджені частинки. Щоб вони «не вихлюпувалися» на стінки, й потрібні надпотужні магніти (рис. 2).

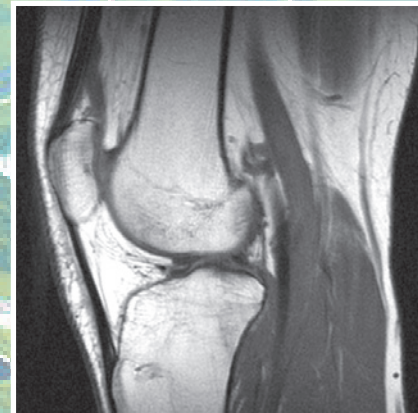
Широко відоме застосування надпотужних магнітів у медицині: за їхньою допомогою одержують зображення внутрішніх органів людини (рис. 3, 4). На відміну від діагностики за допомогою рентгенівських променів, *метод магнітного резонансу* є значно безпечнішим.

Насамкінець наведемо ще один приклад застосування надпотужних магнітів. Інженери вже навчили «літати» важкі потяги, а чи можна навчити літати людину або тварину?

Виявляється, вся справа в матеріалах. У конструкції потяга для підсилення магнітного поля можна використати спеціальні матеріали, а от речовини, з яких складається організм, таких властивостей не мають. Не вживлювати ж заради сумнівного задоволення у тіло «залізячки»! Та на шляху опанування левітації допомогли надпотужні магніти. З'ясувалося, що в разі дуже сильних магнітних полів навіть слабого магнетизму організму достатньо для забезпечення потрібної сили відштовхування. Ученим удалося змусити «літати» жабу, помістивши її під час експерименту над надпотужним магнітом (рис. 5). За словами дослідників, після польоту мандрівниця почувалася нормально. Лишилася «дрібниця»: збільшити магнітне поле в 10–100 разів — і людина пізнає п'янке відчуття польоту.



**Рис. 3.** Обладнання для дослідження внутрішніх органів людини за допомогою магнітного резонансу



**Рис. 4.** Знімок суглоба, отриманий із використанням методу магнітного резонансу



**Рис. 5.** «Летюча» жаба

## Орієнтовні теми проектів

1. Магнітні матеріали та їх використання.
2. Магнітний запис інформації.
3. Вияви та застосування магнітних взаємодій у природі й техніці.
4. Геомагнітне поле Землі.
5. Магнітні бурі та їхній вплив на здоров'я людини.
6. Різноманітні електромагнітні пристрої.
7. Генератори електричного струму.

## Теми рефератів і повідомлень

1. Вплив магнітного поля на якість і швидкість проростання насіння.
2. Вплив магнітного поля на життя та здоров'я людини.
3. Сила Лоренца. Вияви сили Лоренца в природі, застосування в техніці.
4. Історія вивчення магнетизму.
5. Магнітні моменти атома та його складників.
6. Антимагнітні речовини та їх застосування.
7. Внесок українських учених у вивчення магнетизму.
8. М. Фарадей і Дж. Максвелл — засновники теорії електромагнітного поля.
9. Магнітні бурі в атмосфері планет-гігантів Сатурна й Урана.
10. Нікола Тесла — людина, яка випередила свій час.
11. Як працюють прискорювачі заряджених частинок.
12. Що таке магнітний сепаратор і для чого він призначений.
13. МГД-генератор: що він генерує і як працює.
14. Що таке петля гістерезису і як вона пов'язана з намагнічуванням і перемагнічуванням.
15. Магнітна рідина: унікальні властивості, приклади застосування.

## Теми експериментальних досліджень

1. Вивчення властивостей постійних магнітів.
2. Дослідження магнітного поля Землі.
3. Вимірювання магнітної індукції магнітного поля котушки зі струмом; магнітного поля підковоподібного магніту.
4. Виготовлення генератора електричного струму.
5. Дослідження явища електромагнітної індукції.
6. Виготовлення магнітної рідини, дослідження її властивостей.
7. Виготовлення електродвигуна.



# РОЗДІЛ II

## СВІТЛОВІ ЯВИЩА

- Ви неодноразово вимірювали свій зріст, а тепер дізнаєтесь, як, знаючи власний зріст, виміряти висоту величезного дерева
- Ви багато разів бачили веселку, а тепер дізнаєтесь, як її зробити в себе вдома
- Ви добре знаєте приказку «Уночі всі коти сірі», а тепер зможете її пояснити з точки зору фізики
- Ви розумієте, що дехто не може обійтися без окулярів, а тепер дізнаєтесь, чому окуляри допомагають бачити краще



## § 9. СВІТЛОВІ ЯВИЩА. ДЖЕРЕЛА ТА ПРИЙМАЧІ СВІТЛА. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА

Із п'яти органів чуття найбільше інформації про довкілля дає нам зір. Однак бачити навколишній світ ми можемо тільки тому, що нам в очі потрапляє світло. Отже, починаємо вивчення світлових, або *оптичних* (від грецьк. *optikos* — зоровий), явищ — таких, що пов'язані зі світлом.

### 1 Спостерігаємо світлові явища

Зі світловими явищами ви зустрічаєтеся щодня, адже вони є частиною природних умов, у яких ми існуємо.

Деякі зі світлових явищ здаються нам справжнім дивом, наприклад міражі в пустелі, полярні сяйва. Проте погодьтеся, що й більш «звичні» світлові явища: виблиск краплинки роси в сонячному промені, місячна доріжка на плесі, семибарвний міст веселки після літнього дощу, блискавка в грозових хмарах, мерехтіння зір у нічному небі — теж є дивами, бо вони роблять світ навколо нас чудовим, сповненим чарівної краси та гармонії.

### 2 З'ясуємо, що таке джерела світла

**Джерела світла** — це фізичні тіла, частинки (атоми, молекули, йони) яких випромінюють світло.

Погляньте навколо, зверніться до свого досвіду — і ви, без сумніву, назвете багато джерел світла: зоря, спалах блискавки, полум'я свічки, лампа, монітор комп'ютера тощо (див., наприклад, [рис. 9.1](#)). Світло можуть випромінювати й деякі істоти (світлячки — яскраві цятки світла, які можна побачити теплої літньої ночі в лісовій траві, деякі морські тварини, радіолярії та ін.).

Ясної місячної ночі ми можемо досить добре бачити предмети, освітлені місячним сяйвом. Однак Місяць не можна вважати джерелом світла, адже він не випромінює, а тільки відбиває світло, що йде від Сонця.

**?** Чи можна назвати джерелом світла дзеркало, за допомогою якого ви посилаєте «сонячного зайчика»? Обґрунтуйте свою відповідь.



Рис. 9.1. Деякі джерела світла

### 3 Розрізняємо джерела світла

Залежно від походження розрізняють **природні** й **штучні** (створені людиною) джерела світла.

До *природних джерел світла* належать, наприклад, Сонце й зорі, розпечена лава та полярні сніга, деякі світні об'єкти з-поміж тварин і рослин (глибоководна каракатиця, світні бактерії, світлячки).

Природні джерела не можуть задовольнити потребу людини у світлі, тому ще в давнину почали створювати *штучні джерела світла*. Спочатку це були вогнище й каганець, пізніше — свічки, оливні та газові лампи; наприкінці XIX ст. було винайдено електричну лампу. Зараз різні види електричних ламп використовують усюди (рис. 9.2, 9.3).

**?** Які види електричних ламп використовують у житлових будинках? Які лампи застосовують для різнобарвної ілюмінації?

Джерела світла поділяють на **теплові** та **люмінесцентні**.

*Теплові джерела* випромінюють світло завдяки тому, що мають високу температуру (рис. 9.4).

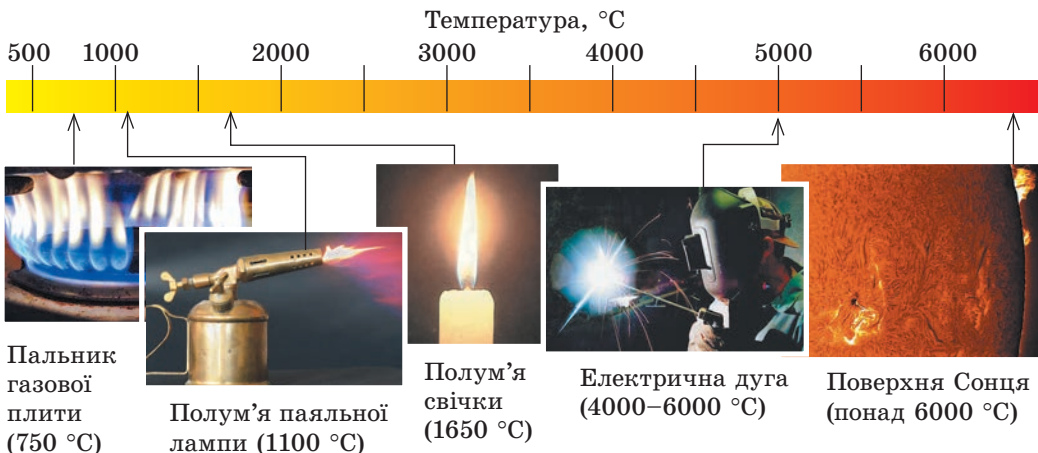
Для світіння *люмінесцентних джерел світла* не потрібна висока температура: світлове випромінювання може бути доволі інтенсивним, а джерело при цьому залишається відносно холодним. Прикладами люмінесцентних джерел світла є полярне сніго та морський планктон, екран телефону і світловий індикатор, світлодіодна лампа та лампа денного світла, дорожній знак і дорожовказ, вкриті люмінесцентною фарбою, тощо.



**Рис. 9.2.** Потужними джерелами штучного світла є галогенні лампи у фарах сучасного автомобіля



**Рис. 9.3.** Сигнали сучасних світлофорів добре помітні навіть тоді, коли яскраво світить сонце. У таких світлофорах лампи розжарення замінено на світлодіодні



**Рис. 9.4.** Деякі теплові джерела світла

## 4

## Вивчаємо точкові та протяжні джерела світла

Джерело світла, яке випромінює світло однаково в усіх напрямках і розмірами якого, зважаючи на відстань до місця спостереження, можна знехтувати, називають **точковим джерелом світла**.

Найкращим прикладом точкових джерел світла є зорі, адже ми спостерігаємо їх із Землі, тобто з відстані, що в мільйони разів перевищує розміри самих зір.

Джерела світла, що не є точковими, називають *протяжними джерелами світла*.

У більшості випадків ми маємо справу саме з протяжними джерелами світла. Це і лампа денного світла, і екран мобільного телефону, і полум'я свічки, і вогонь багаття.

Залежно від умов те саме джерело світла може вважатися як протяжним, так і точковим.



Рис. 9.5. До завдання в § 9



На рис. 9.5 зображено світильник для ландшафтного освітлення саду. У якому, на вашу думку, випадку цей світильник можна вважати точковим джерелом світла?

## 5

## Характеризуємо приймачі світла

**Приймачі світла** — це пристрої, які змінюють свої властивості через дію світла та за допомогою яких можна виявити світлове випромінювання.

Приймачі світла бувають *штучними* і *природними*. У будь-якому приймачі світла енергія світлового випромінювання перетворюється на інші види енергії — теплову, яка виявляється в нагріванні тіл, що поглинають світло, електричну, хімічну та навіть механічну. Унаслідок таких перетворень приймачі певним чином реагують на світло або на його зміну.

Наприклад, деякі системи охорони працюють на *фотоелектричних приймачах світла* — **фотоелементах**. Тонкі пучки світла, що буквально пронизують простір навколо охорнюваного об'єкта, спрямовані на фотоелементи (рис. 9.6). Якщо перекрити один із таких променів, фотоелемент не одержить світлову енергію та негайно «повідомить» про це.

У сонячних батареях фотоелементи перетворюють енергію світла на електричну енергію. Сучасні сонячні електростанції — це великі «енергетичні поля» із сонячних батарей.

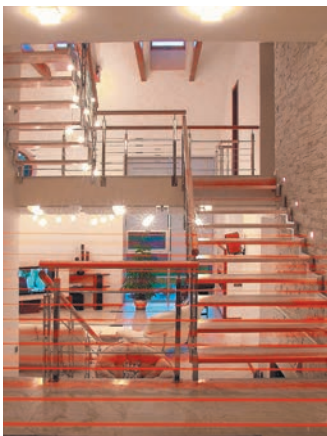


Рис. 9.6. У сучасних охоронних системах використовують чутливі фотоелементи

Тривалий час для отримання фотографій застосовували лише *фотохімічні приймачі світла* (фотоплівка, фотопапір), в яких у результаті дії світла відбуваються певні хімічні реакції (рис. 9.7).

У сучасних цифрових фотоапаратах замість фотоплівки використовують матрицю, яка складається з великої кількості фотоелементів. Кожен із цих елементів приймає «свою» частину світлового потоку, перетворює її на електричний сигнал і передає його в певне місце екрана.

*Природними приймачами світла* є очі живих істот (рис. 9.8). Під дією світла в сітківці ока відбуваються певні хімічні реакції, виникають нервові імпульси, внаслідок чого мозок формує уявлення про довкілля.

## 6 Дізнаємося про швидкість поширення світла

Дивлячись на зоряне небо, ви навряд чи здогадуєтесь, що деякі зорі вже згасли. Понад те, декілька поколінь наших предків милувалися тими самими зорями, а ці зорі не існували вже й тоді! Як це може бути, що світло від зорі є, а власне зорі вже немає?

Річ у тім, що світло поширюється в просторі зі скінченною швидкістю. Швидкість  $c$  поширення світла є величезною, й у вакуумі вона становить приблизно триста тисяч кілометрів за секунду:

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}} *$$

Світло долає багатокілометрові відстані за тисячні частки секунди. Саме тому в разі, коли відстань від приймача до джерела світла є невеликою, здається, що світло поширюється миттєво. А от від далеких зір світло йде до нас тисячі й мільйони років.

\* Під час розв'язування задач будемо використовувати *приблизне значення швидкості поширення світла у вакуумі*:  $c = 300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



Рис. 9.7. Фотоплівка та фотопапір — фотохімічні приймачі світла



Рис. 9.8. Очі живих істот — це природні приймачі світла

Від найближчої до нас зорі Альфа Центавра світло йде до Землі майже 4 роки. Тому, дивлячись на цю зорю, ми насправді бачимо, якою вона була 4 роки тому.

Але ж існують галактики, віддалені від нас на мільйони світлових років (тобто світло йде до них мільйони років). Уявіть собі, що в такій галактиці існує високотехнологічна цивілізація. Тоді виходить, що вони «бачать» нашу планету ще за часів динозаврів!



**Підбиваємо підсумки**

Фізичні тіла, атоми та молекули яких випромінюють світло, називають джерелами світла. Джерела світла бувають теплові й люмінесцентні; природні й штучні; точкові й протяжні. Наприклад, полярне сяйво — природне протяжне люмінесцентне джерело світла.

Пристрої, які змінюють свої параметри в результаті дії світла та за допомогою яких можна виявити світлове випромінювання, називають приймачами світла. У приймачах світла енергія світлового випромінювання перетворюється на інші види енергії. Органи зору живих істот — природні приймачі світла.

Світло поширюється в просторі зі скінченною швидкістю. Швидкість поширення світла у вакуумі приблизно становить:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

**Контрольні запитання**

**1.** Яку роль відіграє світло в житті людини? **2.** Дайте означення джерела світла. Наведіть приклади. **3.** Чи є Місяць джерелом світла? Поясніть свою відповідь. **4.** Наведіть приклади природних і штучних джерел світла. **5.** Що спільного мають теплові й люмінесцентні джерела світла? Чим вони відрізняються? **6.** За яких умов джерело світла вважають точковим? **7.** Які пристрої називають приймачами світла? Наведіть приклади природних і штучних приймачів світла. **8.** Якою є швидкість поширення світла у вакуумі?

**Вправа № 9**

**1.** Установіть відповідність між джерелом світла (див. рисунок) і його видом.

- А природне теплове
- В штучне теплове
- Б природне люмінесцентне
- Г штучне люмінесцентне



1 Телефон



2 Факел



3 Світлячок

- 2.** Для кожного рядка визначте «зайве» слово або словосполучення.
- а) полум'я свічки, Сонце, зоря, Місяць, світлодіодна лампа;
  - б) екран увімкненого комп'ютера, блискавка, лампа розжарення, факел;
  - в) лампа денного світла, полум'я газового пальника, багаття, радіолярія.
- 3.** За який приблизно час світло проходить відстань від Сонця до Землі — 150 млн км?
- 4.** У яких із зазначених випадків Сонце можна вважати точковим джерелом світла?
- а) спостереження сонячного затемнення;
  - б) спостереження Сонця з космічного корабля, який летить за межами Сонячної системи;
  - в) визначення часу за допомогою сонячного годинника.
- 5.** Однією з одиниць довжини, яку застосовують в астрономії, є *світловий рік*. Скільки метрів становить світловий рік, якщо він дорівнює відстані, яку долає за один рік світло у вакуумі?
- 6.** Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, хто першим виміряв швидкість поширення світла. Що саме стало поштовхом для вченого?

## § 10. СВІТЛОВИЙ ПРОМІНЬ І СВІТЛОВИЙ ПУЧОК. ЗАКОН ПРЯМОЛІНІЙНОГО ПОШИРЕННЯ СВІТЛА. СОНЯЧНЕ ТА МІСЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Коли ви граєте в хованки або запускаєте «сонячних зайчиків», то, не підозрюючи того, користуєтеся законом прямолінійного поширення світла. З'ясуємо, в чому полягає цей закон і які явища він пояснює.

### 1 Учимся розрізняти пучок світла і світловий промінь

Для спостереження світлових пучків нам не потрібне жодне спеціальне обладнання (рис. 10.1). Достатньо, наприклад, або відчинити двері в темний коридор із освітленої кімнати, або ввімкнути в темряві ліхтарик, або ясного сонячного дня нещільно зсунути в кімнаті штори. *Пучки світла* в першому випадку падають на підлогу через дверний просвіт; у другому випадку світло в певному напрямку спрямовується рефлектором ліхтарика; в останньому випадку пучки світла проходять до кімнати крізь щілину між шторами.

У реальному житті ми маємо справу тільки з пучками світла. Хоча, погодьтеся, для нас є звичним, коли говорять: промінь сонця, промінь прожектора, зелений промінь тощо. Насправді з погляду *геометричної оптики*, яку ми вивчатимемо цього року, правильно було б казати: пучок сонячних променів, пучок зелених променів тощо. А от для схематичного зображення світлових пучків використовують *світлові промені* (див. рис. 10.2).

**Світловий промінь** — це лінія, що вказує напрямок поширення енергії світла.

Отже, якщо далі в тексті зустрічатимуться фрази, словосполучення на зразок «промінь світла падає», «заломлення променя» тощо, слід мати на увазі, що йдеться про пучок світла, напрямком якого заданий цим променем.

**?** Розгляньте рис. 10.1, 10.2 і визначте, до якого типу світлових пучків належить пучок сонячних променів. *Підказка:* уявіть, як виглядають залізничні рейки для спостерігача, який стоїть на колії і дивиться на рейки вдалину.



Рис. 10.1. Пучки сонячного світла, що пробиваються крізь хмари

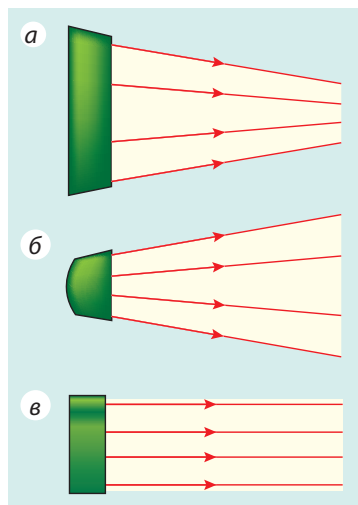


Рис. 10.2. Світловий пучок — це сукупність світлових променів. Світлові пучки: а — збіжний; б — розбіжний; в — паралельний

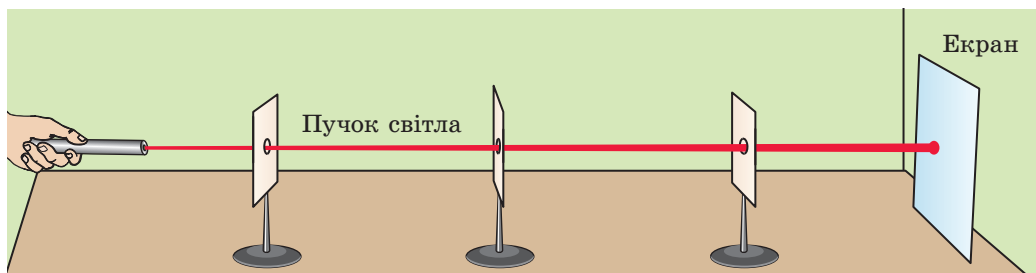


Рис. 10.3. Дослід, який демонструє прямолінійне поширення світла

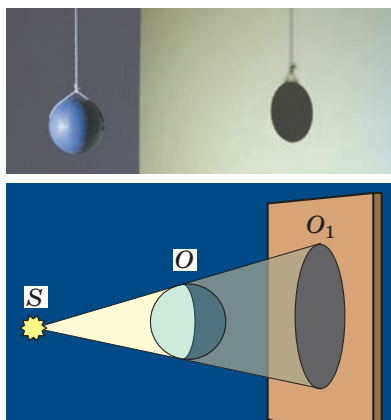


Рис. 10.4. Утворення повної тіні  $O_1$  від предмета  $O$ , освітленого точковим джерелом світла  $S$

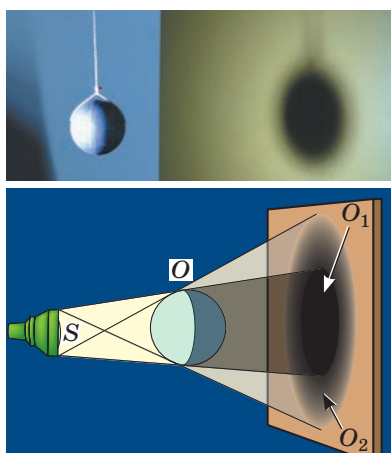


Рис. 10.5. Утворення повної тіні  $O_1$  і півтіні  $O_2$  від предмета  $O$ , освітленого протяжним джерелом світла  $S$

## 2 Переконаємося в прямолінійності поширення світла

Проведемо дослід (див. рис. 10.3). Розташуємо послідовно джерело світла, кілька аркушів картону з отворами діаметром приблизно 5 мм, екран. Розмістимо аркуші таким чином, щоб на екрані з'явилася світлова пляма. Якщо тепер узяти, наприклад, спицю, вона легко пройде крізь усі отвори, тобто виявиться, що отвори розташовані на одній прямій.

Цей дослід демонструє **закон прямолінійного поширення світла**:

У прозорому однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно.

Про цей закон ще понад 2500 років тому писав давньогрецький учений *Евклід*. У геометрії поняття променя та прямої лінії виникли на основі уявлення про світлові промені.

## 3 Дізнаємося про повну тінь і півтінь

Прямолінійністю поширення світла можна пояснити те, що будь-яке непрозоре тіло, освітлене джерелом світла, відкидає **тінь**.

Якщо джерело світла є точковим, тінь від предмета буде чіткою. У цьому випадку утворюється тільки **повна тінь** (рис. 10.4).

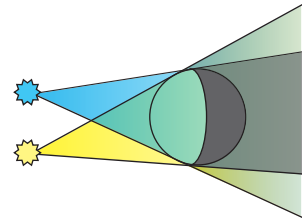
**Повна тінь** — це область простору, в яку не потрапляє світло від джерела.

Якщо тіло освітлене протяжним джерелом світла, то утворюється тінь із нечіткими контурами, тобто утворюється не тільки повна тінь, а ще й **півтінь** (рис. 10.5).



**Півтінь** — це область простору, освітлена деякими з наявних точкових джерел світла або частиною протяжного джерела.

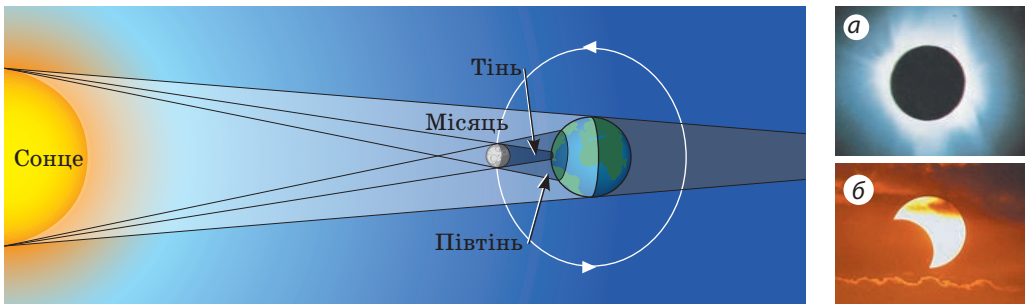
**?** Чи бачимо ми світло від джерела, перебуваючи в області повної тіні? півтіні? Яким, на вашу думку, буде контур півтіні (чітким чи розмитим), якщо предмет освітлювати двома точковими джерелами світла (див. рис. 10.6)?



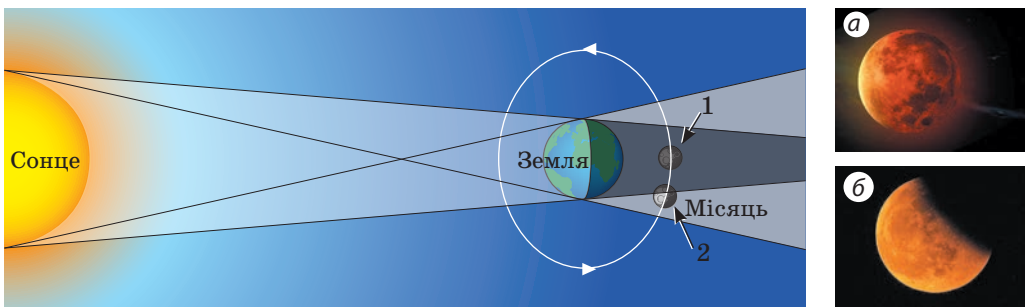
**Рис. 10.6.** До завдання в § 10

Утворення повної тіні й півтіні в космічних масштабах ми спостерігаємо під час сонячного та місячного затемнень. Унаслідок обертання Місяця навколо Землі іноді стається так, що Місяць, Сонце і Земля опиняються на одній прямій. Якщо при цьому Місяць розташований між Сонцем і Землею, то тінь від Місяця падає на Землю, — на Землі спостерігається **сонячне затемнення** (рис. 10.7). У тих місцях Землі, на які впала повна тінь Місяця, спостерігається *повне сонячне затемнення*, а в місцях півтіні — *часткове сонячне затемнення*. За рік на Землі спостерігається 2–5 сонячних затемнень.

Коли Місяць, обертаючись навколо Землі, потрапляє в зону тіні, яку відкидає Земля, настає **місячне затемнення** (рис. 10.8). За рік на Землі спостерігається 2–4 місячних затемнення.



**Рис. 10.7.** Сонячне затемнення: а — повне (в області повної тіні); б — часткове (в області півтіні)

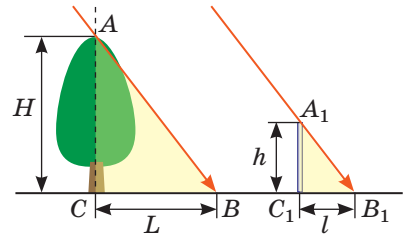


**Рис. 10.8.** Місячне затемнення: а — повне (Місяць у положенні 1); б — часткове (Місяць у положенні 2)

#### 4 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** У сонячний день довжина тіні від вертикально поставленої метрової лінійки дорівнює 24 см, а довжина тіні від дерева — 3,6 м. Визначте висоту дерева.

*Аналіз фізичної проблеми.* Для розв'язання задачі скористаємося законом прямолінійного поширення світла. Використаємо пояснювальний рисунок; зазначимо, що пучок світла, який іде від Сонця, є паралельним.



Дано:

$$h = 1 \text{ м}$$

$$l = 24 \text{ см} = 0,24 \text{ м}$$

$$L = 3,6 \text{ м}$$

Знайти:

$H$  — ?

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

З рисунка бачимо, що  $\triangle ACB \sim \triangle A_1C_1B_1$ .

Із подібності трикутників маємо:  $\frac{H}{h} = \frac{L}{l} \Rightarrow H = \frac{h \cdot L}{l}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[H] = \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{м}; \quad H = \frac{1 \cdot 3,6}{0,24} = \frac{360}{24} = \frac{30}{2} = 15 \text{ (м)}.$$

*Відповідь:*  $H = 15 \text{ м}$ .



#### Підбиваємо підсумки

У прозорому однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Лінію, яка вказує напрямок поширення енергії світла, називають світловим променем.

Через те що світло поширюється прямолінійно, непрозорі тіла відкидають тінь (повну тінь, півтінь).

Повна тінь — область простору, в яку не потрапляє світло від джерела (джерел) світла. Півтінь — область простору, освітлена деякими з наявних точкових джерел світла або частиною протяжного джерела.

Під час сонячних і місячних затемнень спостерігається утворення тіні й півтіні в космічних масштабах.



Першими приладами для вимірювання часу були *сонячні годинники*. Дія сонячного годинника базується на тому, що довжина та розташування тіні від освітлюваного сонцем предмета змінюються протягом дня.

Будь-який сонячний годинник складається з *кадрана* (плоска поверхня з нанесеним на ній циферблатом) та *гномона* (невеликий стрижень із металу, пластику або дерева, закріплений на кадрани).



### Контрольні запитання

1. Дайте означення світлового променя.
2. Сформулюйте закон прямолінійного поширення світла.
3. Які досліди та явища підтверджують прямолінійність поширення світла?
4. За яких умов предмет утворюватиме тільки повну тінь, а за яких — повну тінь і півтінь?
5. Коли на Землі спостерігається повне сонячне затемнення? часткове сонячне затемнення?
6. Коли на Землі спостерігається повне місячне затемнення? часткове місячне затемнення?



### Вправа № 10

1. Око спостерігача розташоване перед щілиною в точці А (рис. 1). Знайдіть побудовою, яку частину дерева бачить спостерігач. У якій точці він бачитиме дерево повністю?
2. М'яч освітлюється двома точковими джерелами світла  $S_1$  і  $S_2$  (рис. 2) Виконайте рисунок у зошиті, зобразіть тінь і півтінь, які відкидає м'яч на екран.

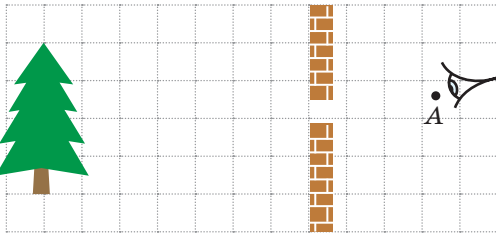


Рис. 1

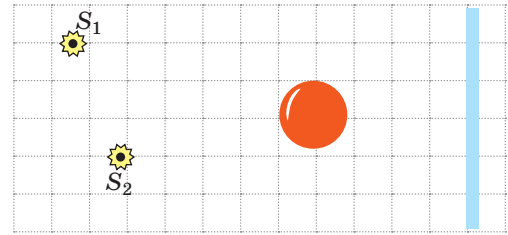


Рис. 2

3. Під час сонячного затемнення на поверхні Землі утворюються тінь і півтінь Місяця (рис. 3, а). На рис. 3, б-г наведено фотографії цього затемнення, зроблені з різних точок Землі. Яку фотографію зроблено в точці 1? у точці 2? у точці 3?

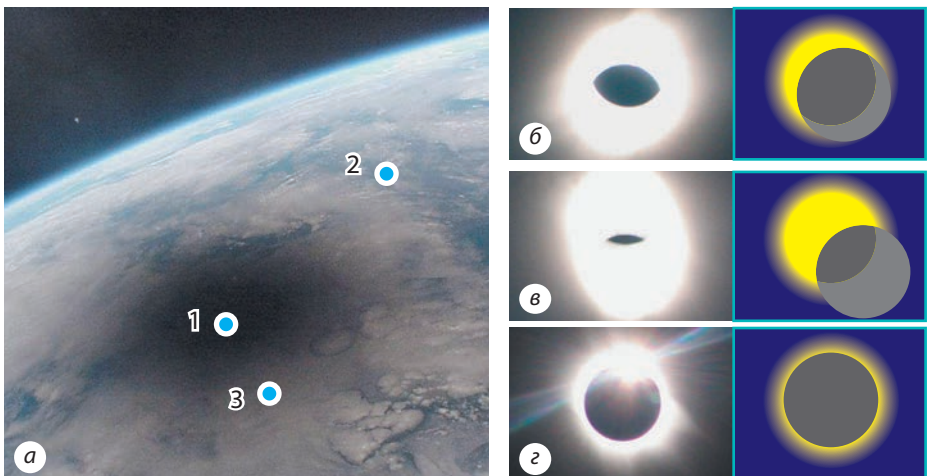


Рис. 3

4. Електрична лампа, що має форму кулі діаметром 6 см, розташована на відстані 1 м від екрана. Визначте, на якій найменшій відстані від екрана слід розмістити тенісну кульку діаметром 40 мм, щоб вона не відкидала тінь на екран, а давала тільки півтінь.

- Чому літак, що летить на великій висоті, не утворює тіні навіть сонячного дня? Поясніть свою відповідь, виконавши відповідний рисунок.
- Космонавт, перебуваючи на Місяці, спостерігає Землю. Що побачить космонавт у той момент, коли на Землі буде повне місячне затемнення? часткове затемнення Місяця?
- Поміркуйте, чому місячне затемнення ми спостерігаємо частіше, ніж сонячне, адже за рік їхня кількість майже однакова.
- Пряму алею парку освітлює електричний ліхтар. Запропонуйте спосіб оцінити, на якій висоті висить ліхтар, без приладів для вимірювання довжини. *Підказка:* ви самі перебуваєте на цій алеї та знаєте свій зріст.
- На рис. 4 зображено прямокутний трикутник. Катет  $a$  дорівнює 5 см, кут  $\alpha$  —  $30^\circ$ . Визначте довжини гіпотенузи та другого катета трикутника. Розв'яжіть задачу двома способами.

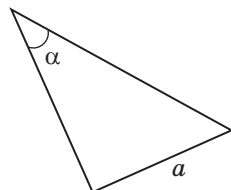


Рис. 4



### Експериментальні завдання

- Розташуйте свічку або настільну лампу на відстані 30–40 см від стіни. Між стіною та свічкою помістіть долоню. Змінюючи відстань від свічки до долоні, спостерігайте зміни, що відбуваються на стіні. Опишіть і поясніть свої спостереження.
- Запропонуйте спосіб, як, використовуючи шпильки, можна перевірити, чи є прямою лінія, проведена на картоні.
- Виготовте *камеру-обскуру* (від латин. *camera* — кімната, *obscura* — темна), або, як її ще називають, пінхол-камеру (від англ. *pinhole camera* — камера з отвором). Схему дії цього пристрою знайдено в роботах *Арістотеля* (IV ст. до н. е.) і китайського філософа *Мо Ті* (V ст. до н. е.). Камеру-обскуру вважають «попередницею» сучасного фотоапарата.

Для виготовлення камери:

- взьміть картонну коробку та зробіть екран: виріжте в одній із стінок коробки невелике віконце (рис. 5, *a*) і заклейте віконце калькою (рис. 5, *б*);
- на протилежному боці коробки зробіть отвір діаметром приблизно 1 мм (рис. 5, *в*).

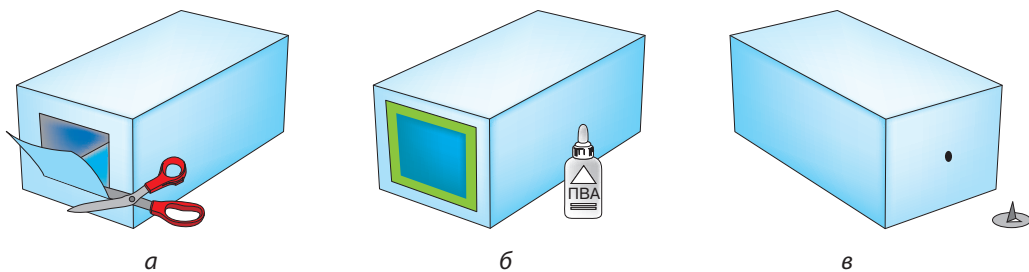


Рис. 5

У затемненому приміщенні наведіть отвір у камері на запалену свічку й отримайте зображення полум'я на екрані. Яким є це зображення: прямим чи перевернутим, збільшеним чи зменшеним, чітким чи розмитим? Згадайте закон прямолінійного поширення світла та поясніть, як утворюється це зображення.

## § 11. ВІДБИВАННЯ СВІТЛА. ЗАКОНИ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА. ПЛОСКЕ ДЗЕРКАЛО

Більшість об'єктів, що вас оточують: будинки, дерева, ваші однокласники тощо, — не є джерелами світла. Проте ви їх бачите. Відповідь на запитання «Чому так?» ви знайдете в цьому параграфі.

### 1 З'ясуємо, чому ми бачимо тіла, які не є джерелами світла

Ви вже знаєте, що в однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно. А що відбувається, якщо на шляху пучка світла є якесь тіло? Частина світла може пройти *крізь* тіло, якщо це тіло прозоре, частина *поглинеться*, а частина обов'язково *відіб'ється* від тіла. Деякі відбиті промені потраплять у наші очі, і ми побачимо це тіло (рис. 11.1).

### 2 Установлюємо закони відбивання світла

Для встановлення законів відбивання світла скористаємося спеціальним приладом — *оптичною шайбою\**. У центрі шайби закріпимо дзеркало і спрямуємо на нього вузький пучок світла так, щоб він давав на поверхні шайби світлу смужку. Бачимо, що пучок світла, відбитий від дзеркала, також дає світлу смужку на поверхні шайби (див. рис. 11.2).

Напрямок пучка світла, який падає, задамо променем  $CO$  (рис. 11.2). Цей промінь називають *падаючим променем*. Напрямок відбитого пучка світла задамо променем  $OK$ . Цей промінь називають *відбитим променем*.

Із точки  $O$  падіння променя проведемо перпендикуляр  $OB$  до поверхні дзеркала. Звернемо увагу на те, що *падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр лежать в одній площині*, — в площині поверхні шайби.

*Кут  $\alpha$  між падаючим променем і перпендикуляром, проведеним із точки падіння, називають кутом падіння; кут  $\beta$  між відбитим променем і даним перпендикуляром називають кутом відбивання.*

Вимірявши кути  $\alpha$  і  $\beta$ , можна перекоонатися, що вони є рівними.

\* *Оптична шайба* — це білий диск, на якому нанесено поділки; на краю диска встановлено освітлювач.



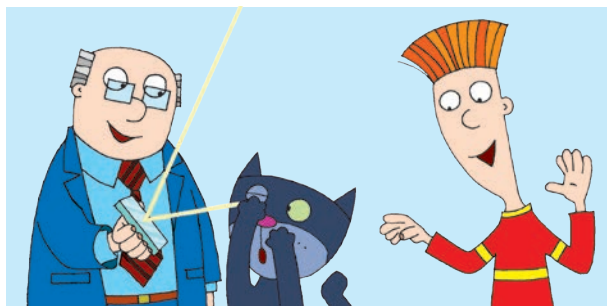
**Рис. 11.1.** У разі відсутності джерела світла неможливо нічого побачити. Якщо ж джерело світла є, ми бачимо не тільки саме джерело, а й предмети, які відбивають світло, що йде від джерела



**Рис. 11.2.** Установлення законів відбивання світла за допомогою оптичної шайби:  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбивання



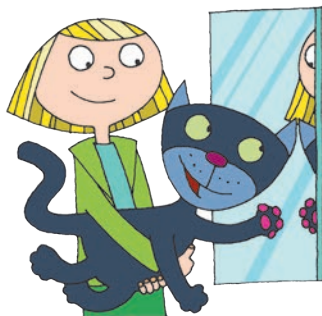
**Рис. 11.3.** Зі зміною кута падіння світла змінюється й кут відбивання. Кут відбивання щоразу дорівнює куту падіння



**Рис. 11.4.** До завдання в § 11



**Рис. 11.5.** Демонстрація оборотності світлових променів: відбитий промінь іде шляхом падаючого променя



**Рис. 11.6.** Кожного разу, підходячи до дзеркала, ми бачимо в ньому свого «двійника». Звісно, ніякого «двійника» там немає, — ми бачимо в дзеркалі своє відображення

Якщо пересувати джерело світла краєм диска, кут падіння світлового пучка змінюватиметься і відповідно змінюватиметься кут відбивання, причому щоразу *кут падіння і кут відбивання світла будуть рівними* (рис. 11.3). Отже, ми встановили **закони відбивання світла**:

1. Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні відбивання, проведенний із точки падіння променя, лежать в одній площині.
2. Кут відбивання дорівнює куту падіння:  $\beta = \alpha$ .

Закони відбивання світла установив давньогрецький вчений *Евклід* ще в III ст. до н. е.

- ?** У якому напрямку слід повернути джерело професору, щоб «сонячний зайчик» потрапив на хлопчика (рис. 11.4)?

За допомогою дзеркала на оптичній шайбі можна продемонструвати також **оборотність світлових променів**: якщо падаючий промінь спрямувати шляхом відбитого, то відбитий промінь піде шляхом падаючого (рис. 11.5).

### **3** Вивчаємо зображення в плоскому дзеркалі

Розглянемо, як утворюється зображення в плоскому дзеркалі (рис. 11.6). Нехай із точкового

джерела світла  $S$  на поверхню плоского дзеркала падає розбіжний пучок світла. Із цього пучка виділимо промені  $SA$ ,  $SB$  і  $SC$ . Користуючись законами відбивання світла, побудуємо відбиті промені  $AA_1$ ,  $BB_1$  і  $CC_1$  (рис. 11.7, а). Ці промені підуть розбіжним пучком. Якщо продовжити їх у протилежному напрямку (за дзеркало), усі вони перетнуться в одній точці —  $S_1$ , яка розташована за дзеркалом.

Якщо частина відбитих від дзеркала променів потрапить у ваше око, вам здаватиметься, що відбиті промені виходять із точки  $S_1$ , хоча в дійсності ніякого джерела світла в точці  $S_1$  не існує. Тому точку  $S_1$  називають **уявним зображенням** точки  $S$ . *Плоске дзеркало завжди дає уявне зображення.*

З'ясуємо, як розташовані предмет і його зображення відносно дзеркала. Для цього звернемося до геометрії. Розглянемо, наприклад, промінь  $SC$ , який падає на дзеркало та відбивається від нього (рис. 11.7, б).

Із рисунка бачимо, що  $\triangle SOC = \triangle S_1OC$  — це прямокутні трикутники, які мають спільну сторону  $CO$  і рівні гострі кути (оскільки за законом відбивання світла  $\alpha = \beta$ ). З рівності трикутників маємо, що  $SO = S_1O$ , тобто точка  $S$  і її зображення  $S_1$  є симетричними відносно поверхні плоского дзеркала.

Те саме можна сказати й про зображення протяжного предмета: *предмет і його зображення симетричні відносно поверхні плоского дзеркала.*

Отже, ми встановили такі загальні характеристики зображень у плоских дзеркалах.

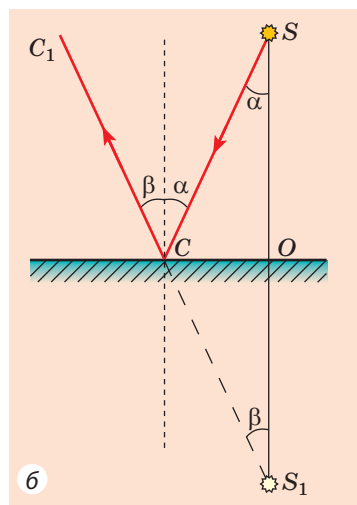
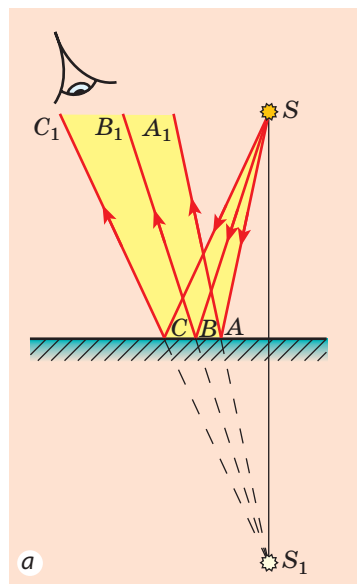
1. Плоске дзеркало дає уявне зображення предмета.

2. Зображення предмета в плоскому дзеркалі та власне предмет є симетричними відносно поверхні дзеркала, і це означає:

1) зображення предмета дорівнює за розміром самому предмету;

2) зображення предмета розташоване на тій самій відстані від поверхні дзеркала, що й предмет;

3) відрізок, який сполучає точку на предметі з відповідною їй точкою на зображенні, є перпендикулярним до поверхні дзеркала.



**Рис. 11.7.** Отримання зображення точкового джерела світла в плоскому дзеркалі:  $S$  — джерело світла;  $S_1$  — уявне зображення джерела світла

#### \* 4 Розрізняємо дзеркальне і розсіяне відбивання світла

Увечері, коли в кімнаті горить світло, ми можемо бачити своє зображення у віконному склі. Але зображення зникає, якщо зсунути штори: дивлячись на тканину, ми свого зображення не побачимо.

А чому в тканині не можна побачити своє зображення? Відповідь на це запитання пов'язана щонайменше з двома фізичними явищами.

Перше таке фізичне явище — **відбивання світла**. Щоб з'явилося зображення, світло має відбитися від поверхні *дзеркально*: після дзеркального відбиття світла, що надходить від точкового джерела  $S$ , продовження відбитих променів перетнуться в одній точці  $S_1$ , яка й буде зображенням точки  $S$  (рис. 11.8, *a*). Таке відбивання можливе тільки від дуже гладеньких поверхонь. Їх так і називають — *дзеркальні поверхні*. Крім звичайного дзеркала прикладами дзеркальних поверхонь є скло, поліровані меблі, спокійна поверхня води тощо (рис. 11.8, *б, в*).

Якщо світло відбивається від шорсткої поверхні, то таке відбивання називають *розсіяним (дифузним)* (рис. 11.9). У цьому випадку відбиті промені поширюються в різних напрямках (саме тому ми бачимо освітлений предмет із будь-якого боку). Зрозуміло, що поверхонь, які розсіюють світло, набагато більше, ніж дзеркальних.

? Погляньте навколо та назвіть щонайменше десять поверхонь, які відбивають світло розсіяно.

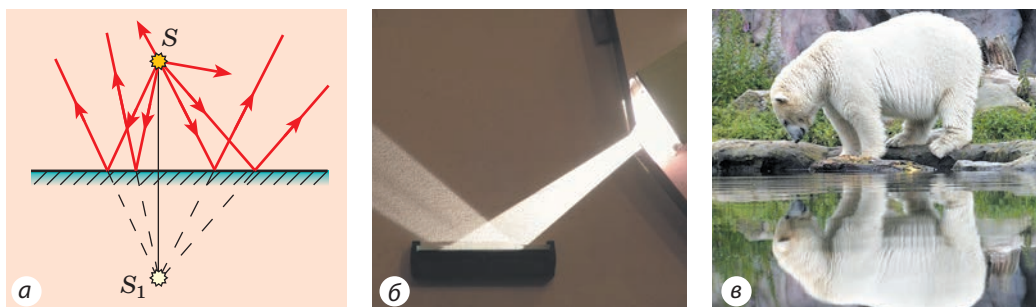


Рис. 11.8. Дзеркальне відбивання світла — це відбивання світла від гладенької поверхні

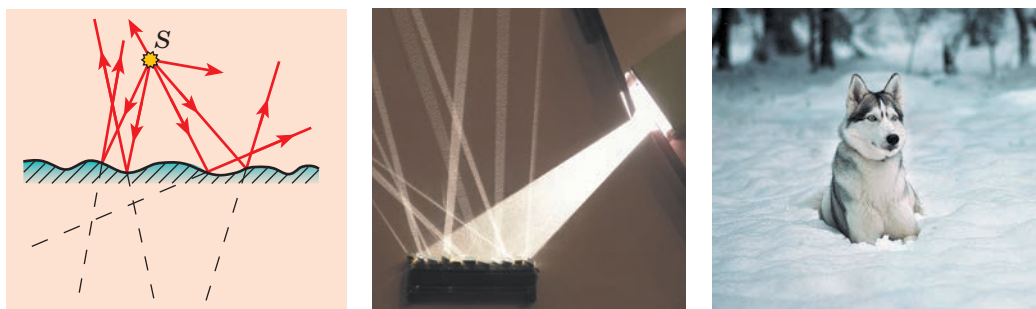


Рис. 11.9. Розсіяне (дифузне) відбивання світла — це відбивання світла від шорсткої поверхні



Друге фізичне явище, яке впливає на можливість бачити зображення, — це **поглинання світла**. Адже світло не тільки відбивається від фізичних тіл, але й поглинається ними. Найкращі відбивачі світла — дзеркала: вони можуть відбивати до 95 % падаючого світла. Добрими відбивачами світла є тіла білого кольору, а от чорна поверхня поглинає практично все світло, що падає на неї.

**?** Коли восени випадає сніг, ночі стають набагато світлішими. Чому? 

**5** Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** На рис. 1 схематично зображено предмет  $BC$  і дзеркало  $NM$ . Знайдіть графічно ділянку, з якої зображення предмета  $BC$  видно повністю.

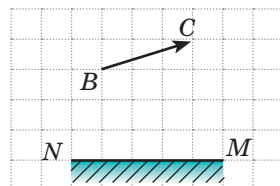


Рис. 1

*Аналіз фізичної проблеми.* Щоб бачити зображення певної точки предмета в дзеркалі, необхідно, щоб в око спостерігача відбилася хоча б частина променів, які падають із цієї точки на дзеркало. Зрозуміло: якщо в око відіб'ються промені, які виходять із крайніх точок предмета, то в око відіб'ються й промені, які виходять з усіх точок предмета.

*Розв'язання, аналіз результатів*

1. Побудуємо точку  $B_1$ , яка є зображенням точки  $B$  у плоскому дзеркалі (рис. 2, а). Область, обмежена поверхнею дзеркала та променями, відбитими від крайніх точок дзеркала, і буде тією ділянкою, з якої видно зображення  $B_1$  точки  $B$  у дзеркалі.

2. Аналогічно побудувавши зображення  $C_1$  точки  $C$ , визначимо область її бачення у дзеркалі (рис. 2, б).

3. Бачити зображення всього предмета спостерігач може тільки в тому випадку, якщо в його око потрапляють промені, які дають обидва зображення —  $B_1$  і  $C_1$  (рис. 2, в). Отже, оранжева ділянка — це ділянка, із якої зображення предмета видно повністю.

**?** Проаналізуйте отриманий результат, ще раз розгляньте рис. 2 до задачі та запропонуйте простіший спосіб знайти область бачення предмета в плоскому дзеркалі. Перевірте свої припущення, побудувавши область бачення кількох предметів у два способи.

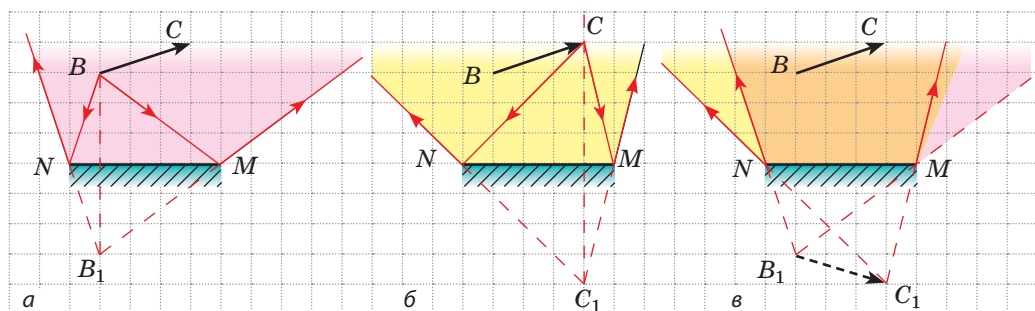


Рис. 2



### Підбиваємо підсумки

Усі видимі тіла відбивають світло. Під час відбивання світла виконуються два закони відбивання світла: 1) промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні відбивання, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині; 2) кут відбивання дорівнює куту падіння.

Зображення предмета в плоскому дзеркалі є уявним, дорівнює за розміром самому предмету та розташоване на такій самій відстані від дзеркала, що й предмет.

\* Розрізняють дзеркальне й розсіяне відбивання світла. У випадку дзеркального відбивання ми можемо бачити уявне зображення предмета у відбиваючій поверхні; у випадку розсіяного відбивання зображення не існує.



### Контрольні запитання

1. Чому ми бачимо тіла навколо нас? 2. Який кут називають кутом падіння? кутом відбивання? 3. Сформулюйте закони відбивання світла. 4. За допомогою якого приладу можна переконатись у справдженні законів відбивання світла? 5. У чому полягає властивість оборотності світлових променів? 6. У якому випадку зображення називають уявним? 7. Схарактеризуйте зображення предмета в плоскому дзеркалі. \* 8. Чим розсіяне відбивання світла відрізняється від дзеркального?



### Вправа № 11

- Дівчинка стоїть на відстані 1,5 м від плоского дзеркала. На якій відстані від дівчинки розташоване її відображення? Схарактеризуйте його.
- Водій автомобіля, глянувши в дзеркало заднього огляду, побачив у ньому пасажира, який сидить на задньому сидінні. Чи може пасажир у цей момент, дивлячись у те саме дзеркало, побачити водія?
- Перенесіть рис. 1 до зошита, для кожного випадку побудуйте падаючий (або відбитий) промінь. Позначте кути падіння й відбивання.
- Кут між падаючим і відбитим променями становить  $80^\circ$ . Чому дорівнює кут падіння променя?
- Предмет був розташований на відстані 30 см від плоского дзеркала. Потім предмет пересунули на 10 см від дзеркала в напрямку, перпендикулярному до поверхні дзеркала, і на 15 см — паралельно їй. Якою була відстань між предметом і його відображенням? якою вона стала?
- Ви прямуєте до дзеркальної вітрини зі швидкістю 4 км/год. Із якою швидкістю наближається до вас ваше відображення? На скільки скоротиться відстань між вами і вашим відображенням, коли ви пройдете 2 м?

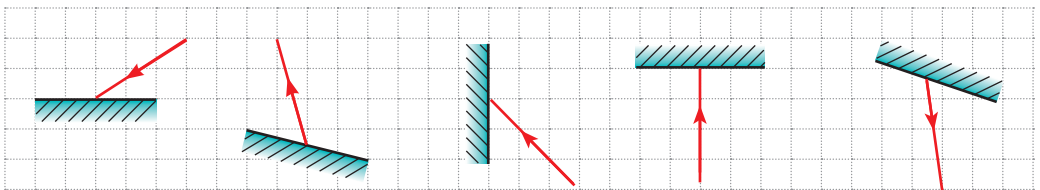


Рис. 1

7. Сонячний промінь відбивається від поверхні озера. Кут між падаючим променем і горизонтом удвічі більший, ніж кут між падаючим і відбитим променями. Чому дорівнює кут падіння променя?
8. Дівчинка дивиться у дзеркало, що висить на стіні під невеликим кутом (рис. 2).
  - 1) Побудуйте зображення дівчинки у дзеркалі.
  - 2) Знайдіть графічно, яку частину свого тіла бачить дівчинка; область, із якої дівчинку видно повністю.
  - 3) Які спостережатимуться зміни, якщо дзеркало поступово затуляти непрозорим екраном?
9. Уночі у світлі фар автомобіля калюжа на асфальті здається водієві темною плямою на світлішому тлі дороги. Чому?
10. На рис. 3 зображено хід променів у *перископі* — пристрої, дія якого ґрунтується на прямолінійному поширенні світла. Поясніть, як працює цей пристрій. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, де його застосовують.

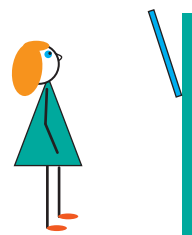


Рис. 2

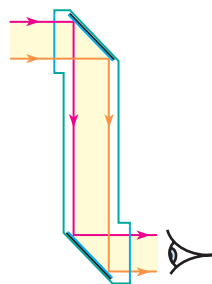


Рис. 3



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3



**Тема.** Дослідження відбивання світла за допомогою плоского дзеркала.

**Мета:** експериментально перевірити закони відбивання світла.

**Обладнання:** джерело світла (свічка або електрична лампа на підставці), плоске дзеркало, екран зі щільною, кілька чистих білих аркушів, лінійка, транспортір, олівець.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

#### II Підготовка до експерименту

1. Перш ніж виконувати роботу, згадайте: 1) вимоги безпеки під час роботи зі скляними предметами; 2) закони відбивання світла.
2. Зберіть експериментальну установку (рис. 1). Для цього:
  - 1) установіть екран зі щільною на білому аркуші;
  - 2) переміщуючи джерело світла, отримайте на папері смужку світла;
  - 3) під деяким кутом до смужки та перпендикулярно до аркуша установіть плоске дзеркало, переконавшись, що відбитий пучок світла також дає на аркуші добре помітну смужку.

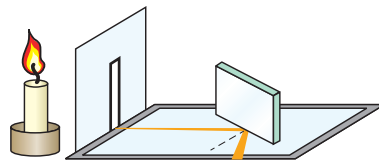


Рис. 1

**▶ Експеримент**

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника).*

1. Добре заточеним олівцем накресліть на папері лінію вздовж дзеркала.
2. Поставте на аркуші три точки: першу — посередині падаючого пучка світла, другу — посередині відбитого пучка світла, третю — в місці падіння світлового пучка на дзеркало (рис. 2).

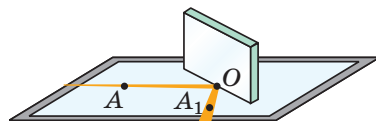


Рис. 2

3. Повторіть описані дії ще кілька разів (на різних аркушах), установлюючи дзеркало під різними кутами до падаючого пучка світла.
4. Змінивши кут між дзеркалом і аркушем, переконайтесь у тому, що в цьому випадку ви не побачите відбитого пучка світла.

**▶ Опрацювання результатів експерименту**

Для кожного досліджу:

- 1) побудуйте промінь, що падає на дзеркало, та відбитий промінь;
- 2) із точки падіння променя встановіть перпендикуляр до поверхні дзеркала;
- 3) позначте та виміряйте кут падіння ( $\alpha$ ) і кут відбивання ( $\beta$ ) світла. Результати вимірювань занесіть до таблиці.

Номер досліджу	Кут падіння $\alpha$ , градуси	Кут відбивання $\beta$ , градуси
1		
...		

**□ Аналіз експерименту та його результатів**

Проаналізуйте експеримент та його результати. Зробіть висновок, у якому зазначте: 1) яке співвідношення між кутом падіння світлового променя та кутом його відбивання ви встановили; 2) чи виявилися результати дослідів абсолютно точними, а якщо ні, то в чому причини похибки.

**+ Творче завдання**

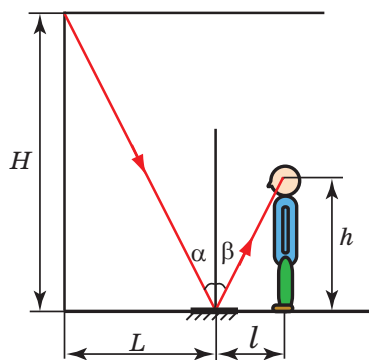
Скориставшись рисунком, продумайте та запишіть план проведення експерименту з визначення висоти кімнати за допомогою плоского дзеркала; зазначте необхідне обладнання. За можливості проведіть експеримент.

**\* Завдання «із зірочкою»**

Для кожного досліджу оцініть відносну похибку експерименту за формулою:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{\beta}{\alpha} \right| \cdot 100\%,$$

де  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбивання.



## § 12. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА НА МЕЖІ ПОДІЛУ ДВОХ СЕРЕДОВИЩ. ЗАКОНИ ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА

В одному з давньогрецьких трактатів описано дослід: «Потрібно стати так, щоб плоске кільце, покладене на дно посудини, сховалося за її краєм. Потім, не змінюючи положення очей, налити в посудину воду. Світло заломиться на поверхні води, і кільце стане видимим». Такий «фокус» ви можете показати своїм друзям і зараз (див. рис. 12.1), а от пояснити його зможете тільки після вивчення цього параграфа.



**Рис. 12.1.** «Фокус» із монетою. Якщо в чашці немає води, ми не бачимо монету, що лежить на її дні (а); якщо ж налити воду, дно чашки ніби підніметься і монета стане видимою (б)

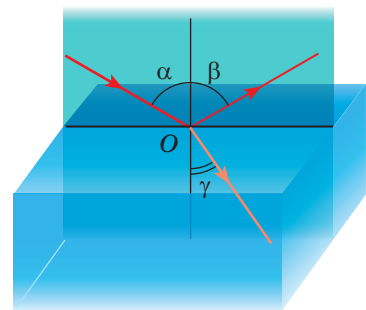
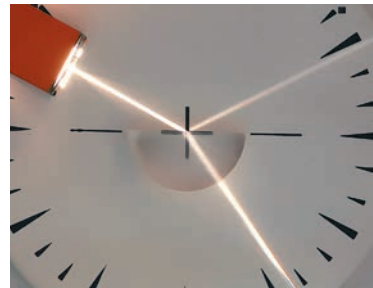
### 1 Установлюємо закони заломлення світла

Проведемо дослід (рис. 12.2). На плоску поверхню прозорого скляного півциліндра, закріпленого на оптичній шайбі, спрямуємо вузький пучок світла, — світло не тільки відіб'ється від поверхні циліндра, але й частково пройде крізь скло. Отже, під час переходу з повітря в скло напрямок поширення світла змінюється.

Зміну напрямку поширення світла на межі поділу двох середовищ називають **заломленням світла**.

Кут  $\gamma$  (гамма), утворений заломленим променем і перпендикуляром до межі поділу двох середовищ, проведеним із точки падіння променя, називають **кутом заломлення**.

Провівши низку дослідів з оптичною шайбою, помітимо, що зі збільшенням кута падіння кут заломлення теж збільшується, а зі зменшенням кута падіння кут заломлення зменшується (рис. 12.3). Якщо ж світло падає перпендикулярно до межі поділу двох середовищ (кут падіння  $\alpha=0$ ), напрямок поширення світла не змінюється.



**Рис. 12.2.** Спостереження заломлення світла в разі його переходу з повітря в скло:  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбивання;  $\gamma$  — кут заломлення



**Рис. 12.3.** Установлення законів заломлення світла: в разі зменшення кута падіння ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ) кут заломлення теж зменшується ( $\gamma_2 < \gamma_1$ ), при цьому  $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2}$

Першу згадку про заломлення світла можна знайти в працях давньогрецького філософа *Арістотеля* (IV ст. до н. е.), який замислювався: «Чому палиця у воді здається переламаною?». А от закон, який кількісно описує заломлення світла, був установлений лише в 1621 р. голландським природознавцем *Віллебрордом Снелліусом* (1580–1626).

#### Закони заломлення світла:

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, встановлений із точки падіння променя, лежать в одній площині.
2. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною незмінною:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21},$$

де  $n_{21}$  — фізична величина, яку називають *відносним показником заломлення середовища 2* (середовища, в якому світло поширюється після заломлення) *відносно середовища 1* (середовища, із якого світло падає).

## 2 Дізнаємося про причину заломлення світла

Чому ж світло, переходячи з одного середовища в інше, змінює свій напрямок?

Річ у тім, що в різних середовищах світло поширюється з різною швидкістю, але завжди повільніше, ніж у вакуумі. Наприклад, у воді швидкість поширення світла в 1,33 разу менша, ніж у вакуумі; коли світло переходить із води в скло, швидкість поширення світла зменшується ще в 1,3 разу; у повітрі швидкість поширення світла в 1,7 разу більша, ніж у склі, й лише трохи менша (приблизно в 1,0003 разу), ніж у вакуумі.

*Саме зміна швидкості поширення світла в разі переходу з одного прозорого середовища в інше є причиною заломлення світла.*

Прийнято говорити про **оптичну густину середовища**: чим менша швидкість поширення світла в середовищі (чим більший показник заломлення), тим більшою є оптична густина середовища.

**?** Як ви вважаєте, оптична густина якого середовища більша — води чи скла? оптична густина якого середовища менша — скла чи повітря?

### 3 З'ясуємо фізичний зміст показника заломлення

**Відносний показник заломлення** ( $n_{21}$ ) показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі 1 більша (або менша), ніж швидкість поширення світла в середовищі 2:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Згадавши другий закон заломлення світла:  $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ , маємо:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$$

Проаналізувавши останню формулу, доходимо висновків:

1) чим більше на межі поділу двох середовищ змінюється швидкість поширення світла, тим більше світло заломлюється;

2) якщо промінь світла переходить у середовище з більшою оптичною густиною (тобто швидкість світла зменшується:  $v_2 < v_1$ ), то кут заломлення є меншим від кута падіння:  $\gamma < \alpha$  (див., наприклад, [рис. 12.2](#), [12.3](#));

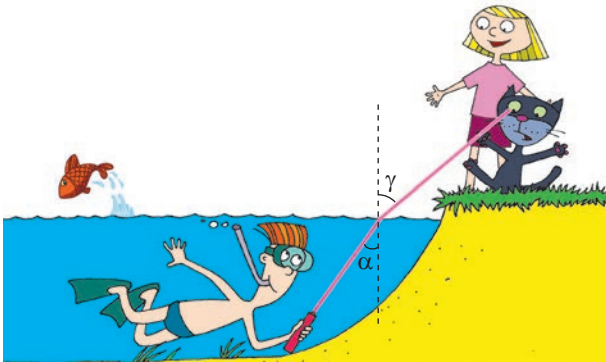
3) якщо промінь світла переходить у середовище з меншою оптичною густиною (тобто швидкість світла збільшується:  $v_2 > v_1$ ), то кут заломлення є більшим за кут падіння:  $\gamma > \alpha$  ([рис. 12.4](#)).

Зазвичай швидкість поширення світла в середовищі порівнюють зі швидкістю його поширення у вакуумі. Коли світло потрапляє в середовище з вакууму, показник заломлення  $n$  називають *абсолютним показником заломлення*.

**Абсолютний показник заломлення** показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі менша, ніж у вакуумі:

$$n = \frac{c}{v},$$

де  $c$  — швидкість поширення світла у вакуумі ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с);  $v$  — швидкість поширення світла в середовищі.



**Рис. 12.4.** У разі переходу світла із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною кут заломлення є більшим за кут падіння ( $\gamma > \alpha$ )

Речовина	Абсолютний показник заломлення $n$
Повітря	1,0003
Лід	1,31
Вода	1,33
Бензин	1,50
Скло	1,43–2,17
Кварц	1,54
Алмаз	2,42

Швидкість поширення світла у вакуумі більша, ніж у будь-якому середовищі, тому абсолютний показник заломлення завжди більший за одиницю (див. таблицю).

*Зверніть увагу:  $n_{\text{повітря}} \approx 1$ , тому, розглядаючи перехід світла з повітря в середовище, вважають, що відносний показник заломлення середовища дорівнює абсолютному показнику.*

Явище заломлення світла є основою роботи численних оптичних пристроїв, про деякі з яких ви дізнаєтеся пізніше.

#### \* 4 Застосовуємо явище повного внутрішнього відбивання світла

Розглянемо випадок, коли світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною (рис. 12.5). Бачимо, що в разі збільшення кута падіння ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) кут заломлення  $\gamma$  наближається до  $90^\circ$ , яскравість заломленого пучка зменшується, а яскравість відбитого, навпаки, збільшується. Зрозуміло, якщо й далі збільшувати кут падіння, кут заломлення сягне  $90^\circ$ , заломлений пучок зникне, а падаючий пучок цілком (без втрат енергії) повернеться в перше середовище — світло повністю відіб'ється.

Явище, за якого заломлення світла відсутнє (світло повністю відбивається від середовища з меншою оптичною густиною), називають **повним внутрішнім відбиванням світла**.

Явище повного внутрішнього відбивання добре знайоме тим, хто хоча б раз плавав під водою з розплющеними очима (рис. 12.6).



**Рис. 12.5.** Якщо світло падає зі скла в повітря, в разі збільшення кута падіння кут заломлення наближається до  $90^\circ$ , а яскравість заломленого пучка зменшується



**Рис. 12.6.** Спостерігачеві, який перебуває під водою, частина поверхні води здається блискучою, мов дзеркало

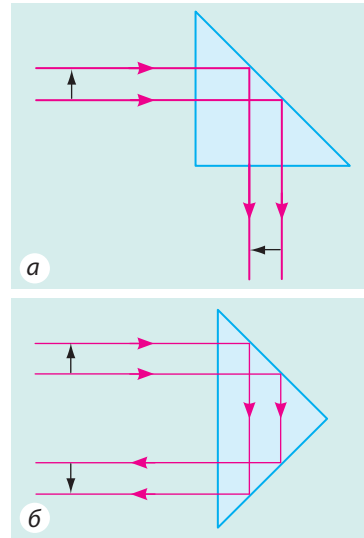


Ювеліри протягом сторіч використовують явище повного внутрішнього відбивання, щоб підвищити привабливість коштовних каменів. Природні камені огранюють — надають їм форми багатогранників: грані каменя виконують роль «внутрішніх дзеркал», і камінь «грає» в променях світла, що падає на нього.

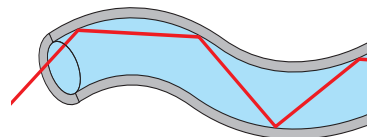
Повне відбивання світла застосовують в оптичній техніці (рис. 12.7). Проте головне застосування цього явища пов'язане з **волоконною оптикою**. Якщо в торець суцільної «скляної нитки» спрямувати пучок світла, то після багаторазового відбивання світло вийде на її протилежному кінці незалежно від того, якою буде трубка — вигнутою чи прямою. Таку «нитку» називають **світловодом** (рис. 12.8).

Світловоди застосовують у медицині для дослідження внутрішніх органів (ендоскопія); у техніці, зокрема для виявлення несправностей усередині двигунів без їх розбирання; для освітлення сонячним світлом закритих приміщень; у декоративних світильниках тощо (рис. 12.9).

Однак найчастіше світловоди використовують як кабелі для передачі інформації (рис. 12.10). «Скляний кабель» є набагато дешевшим, він легший за мідний, практично не змінює своїх властивостей під впливом навколишнього середовища, дозволяє передавати сигнали на великі відстані без підсилення. Сьогодні волоконно-оптичні лінії зв'язку стрімко витісняють традиційні. Коли ви будете дивитися телевизор або користуватися Інтернетом, згадайте, що більшу частину свого «шляху» сигнал долає «скляною дорогою».



**Рис. 12.7.** У багатьох оптичних приладах напрямок поширення світла змінюють за допомогою *призм повного відбивання*: а — призма повертає зображення; б — призма перевертає зображення



**Рис. 12.8.** Поширення світлового пучка світловодом



**Рис. 12.9.** Декоративний світильник зі світловодами



**Рис. 12.10.** Оптиковолоконний кабель

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Світловий промінь переходить із середовища 1 у середовище 2 (рис. 12.11, а). Швидкість поширення світла в середовищі 1 становить  $2,4 \cdot 10^8$  м/с. Визначте абсолютний показник заломлення середовища 2 і швидкість поширення світла в цьому середовищі.

*Аналіз фізичної проблеми.* Із рис. 12.11, а бачимо, що на межі поділу двох середовищ світло заломлюється, отже, швидкість його поширення змінюється.

Виконаємо пояснювальний рисунок (рис. 12.11, б), на якому:

- 1) зобразимо промені, наведені в умові задачі;
- 2) проведемо через точку падіння променя перпендикуляр до межі поділу двох середовищ;
- 3) позначимо  $\alpha$  кут падіння і  $\gamma$  — кут заломлення.

Абсолютний показник заломлення — це показник заломлення відносно вакууму. Тому для розв'язання задачі слід згадати значення швидкості поширення світла у вакуумі та знайти швидкість поширення світла в середовищі 2 ( $v_2$ ).

Для знаходження  $v_2$  визначимо синуси кута падіння та кута заломлення.

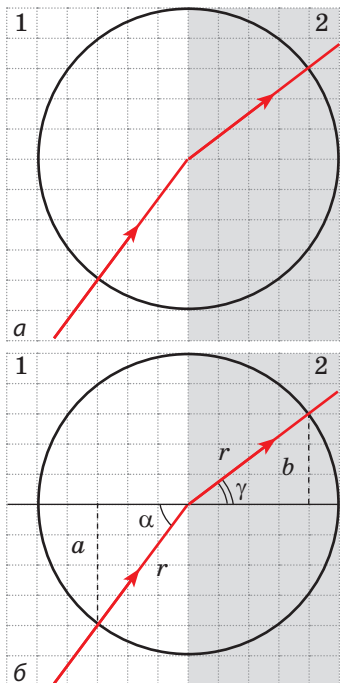


Рис. 12.11. До задачі в § 12

**Дано:**

$$v_1 = 2,4 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

**Знайти:**

$$n_2 - ?$$

$$v_2 - ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

За означенням абсолютного показника заломлення:

$$n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Оскільки  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ , то  $v_2 = \frac{v_1 \sin \gamma}{\sin \alpha}$ .

Із рис. 12.11, б бачимо, що  $\sin \alpha = \frac{a}{r}$ , а  $\sin \gamma = \frac{b}{r}$ , де  $r$  — радіус кола.

Знайдемо значення шуканих величин:

$$\sin \alpha = \frac{a}{r} = \frac{4}{5} = 0,8, \quad \sin \gamma = \frac{b}{r} = \frac{3}{5} = 0,6;$$

$$v_2 = \frac{2,4 \cdot 10^8 \cdot 0,6}{0,8} = 1,8 \cdot 10^8 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right); \quad n_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^8} = \frac{30}{18} = \frac{5}{3} \approx 1,7.$$

*Аналіз розв'язання.* За умовою задачі кут падіння більший, ніж кут заломлення, і це означає, що швидкість світла в середовищі 2 менша від швидкості світла в середовищі 1. Отже, отримані результати є реальними.

**Відповідь:**  $n_2 \approx 1,7$ ;  $v_2 = 1,8 \cdot 10^8$  м/с.



### Підбиваємо підсумки

Світловий пучок, падаючи на межу двох середовищ, поділяється на два пучки. Один із них — відбитий — відбивається від поверхні, підпорядковуючись законам відбивання світла. Другий — заломлений — проходить у друге середовище, змінюючи свій напрямок.

Закони заломлення світла:

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.

2. Для двох даних середовищ відношення синуса кута падіння  $\alpha$  до синуса кута заломлення  $\gamma$  є незмінною величиною:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$ .

Причина заломлення світла — зміна швидкості його поширення в разі переходу з одного середовища в інше. Відносний показник заломлення  $n_{21}$  показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі 1 більша (або менша), ніж швидкість поширення світла в середовищі 2:  $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ .

У випадку коли світло потрапляє в середовище із вакууму, показник заломлення  $n$  називають абсолютним показником заломлення:  $n = c/v$ .

Якщо під час переходу світла із середовища 1 у середовище 2 швидкість поширення світла зменшилась (тобто показник заломлення середовища 2 більший за показник заломлення середовища 1:  $n_2 > n_1$ ), то говорять, що світло перейшло із середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою оптичною густиною (і навпаки).



### Контрольні запитання

1. Які досліди підтверджують явище заломлення світла на межі поділу двох середовищ? 2. Сформулюйте закони заломлення світла. 3. У чому причина заломлення світла? 4. Що показує показник заломлення світла? 5. Як швидкість поширення світла пов'язана з оптичною густиною середовища? 6. Дайте означення абсолютного показника заломлення.



### Вправа № 12

1. Перенесіть рис. 1 до зошита. Вважаючи, що середовище 1 має більшу оптичну густину, ніж середовище 2, для кожного випадку схематично побудуйте падаючий (або заломлений) промінь, позначте кут падіння та кут заломлення.

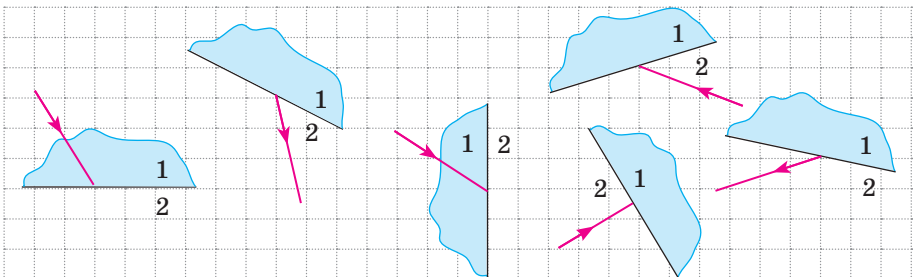


Рис. 1

- Обчисліть швидкість поширення світла в алмазі; воді; повітрі.
- Промінь світла падає з повітря у воду під кутом  $60^\circ$ . Кут між відбитим і заломленим променями становить  $80^\circ$ . Обчисліть кут заломлення променя.
- Коли ми, стоячи на березі водойми, намагаємося на око визначити її глибину, вона завжди здається меншою, ніж є насправді. Скориставшись рис. 2, поясніть, чому так відбувається.
- За який час світло доходить від дна озера глибиною 900 м до поверхні води?
- Поясніть «фокус» із кільцем (монетою), згаданий на початку § 12 (див. рис. 12.1).
- Світловий промінь переходить із середовища 1 у середовище 2 (рис. 3). Швидкість поширення світла в середовищі 1 становить  $2,5 \cdot 10^8$  м/с. Визначте:
  - оптична густина якого середовища є більшою;
  - показник заломлення середовища 2 відносно середовища 1;
  - швидкість поширення світла в середовищі 2;
  - абсолютний показник заломлення кожного середовища.
- Наслідком заломлення світла в атмосфері Землі є виникнення міражів, а також той факт, що ми бачимо Сонце й зорі трохи вище від їхнього реального положення. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про ці природні явища докладніше.

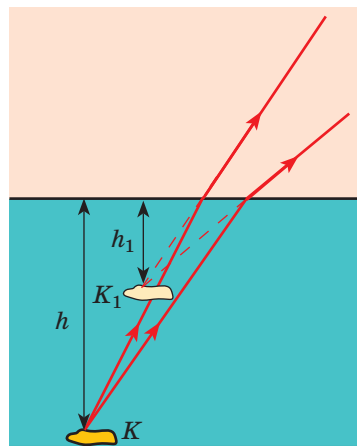


Рис. 2

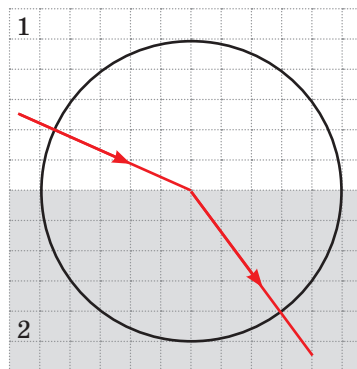


Рис. 3



### Експериментальні завдання

- «Фокус із монетою». Продемонструйте кому-небудь зі своїх друзів чи близьких дослід із монетою (див. рис. 12.1). Поясніть його.
- «Водяне дзеркало». Поспостерегайте повне відбивання світла. Для цього заповніть склянку приблизно наполовину водою. Опустіть у склянку якийсь предмет, наприклад корпус пластмасової ручки, бажано з написом. Тримавши склянку в руці, розташуйте її приблизно на відстані 25–30 см від очей (див. рисуюнок). У ході дослідів ви маєте стежити за корпусом ручки. Спочатку, підвівши очі, ви будете бачити весь корпус ручки (як підводну, так і надводну частини). Повільно пересувайте від себе склянку, не змінюючи висоти її розташування. Коли склянка буде достатньо віддалена від ваших очей, поверхня води стане для вас дзеркальною — ви побачите дзеркальне відображення підводної частини корпусу ручки. Поясніть спостережуване явище.





**Тема.** Дослідження заломлення світла.

**Мета:** визначити показник заломлення скла відносно повітря.

**Обладнання:** скляна пластинка з паралельними гранями, олівець, косинець із міліметровою шкалою, циркуль.

## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

### II Підготовка до експерименту

1. Перед тим як виконувати роботу, згадайте:

- 1) вимоги безпеки під час роботи зі скляними предметами;
- 2) закони заломлення світла;
- 3) формулу для визначення показника заломлення.

2. Підготуйте рисунки для виконання роботи (див. рис. 1). Для цього:

- 1) покладіть скляну пластинку на сторінку зошита і гостро заточеним олівцем окресліть контур пластинки;
- 2) на відрізку, що відповідає положенню верхньої заломної грані пластинки:

- позначте точку  $O$ ;
- проведіть через точку  $O$  пряму  $k$ , перпендикулярну до даного відрізка;
- за допомогою циркуля побудуйте коло радіусом 2,5 см із центром у точці  $O$ ;

3) під кутом приблизно  $45^\circ$  накресліть промінь, який задаватиме напрямок пучка світла, що падає в точку  $O$ ; позначте точку перетину променя і кола літерою  $A$ ;

4) повторіть дії, описані в пунктах 1–3, ще двічі (виконайте ще два рисунки), спочатку збільшивши, а потім зменшивши заданий кут падіння променя світла.

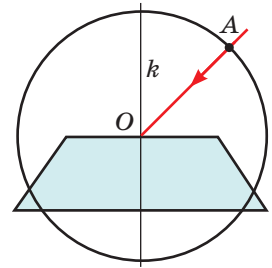


Рис. 1

### ► Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника).*

1. Накладіть скляну пластинку на перший контур.
2. Дивлячись на промінь  $AO$  крізь скло, поставте поряд із нижньою гранню пластинки точку  $M$  так, щоб вона здавалася розташованою на продовженні променя  $AO$  (рис. 2).
3. Повторіть дії, описані в пунктах 1 і 2, ще для двох контурів.

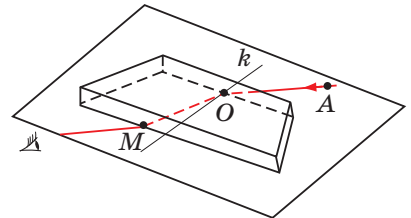


Рис. 2

**Опрацювання результатів експерименту**

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

Для кожного досліджу (див. рис. 3):

- 1) проведіть заломлений промінь  $OM$ ;
- 2) знайдіть точку перетину променя  $OM$  із колом (точку  $B$ );
- 3) із точок  $A$  і  $B$  опустіть перпендикуляри на пряму  $k$ , виміряйте довжини  $a$  і  $b$  отриманих відрізків і радіус кола  $r$ ;
- 4) визначте показник заломлення скла відносно повітря:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \text{ де } \sin \alpha = \frac{a}{r}, \text{ а } \sin \beta = \frac{b}{r}, \text{ тому}$$

$$n = \frac{a}{b}.$$

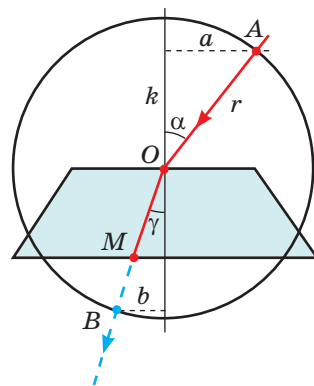


Рис. 3

Номер досліджу	Довжина відрізка $a$ , мм	Довжина відрізка $b$ , мм	Відносний показник заломлення $n$
1			
...			

**Аналіз експерименту та його результатів**

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому зазначте: 1) яку фізичну величину ви визначали; 2) який результат отримали; 3) чи залежить значення отриманої величини від кута падіння світла; 4) у чому причини можливої похибки експерименту.

**+ Творче завдання**

Скориставшись рис. 4, продумайте та запишіть план проведення експерименту з визначення показника заломлення води відносно повітря. За можливості проведіть експеримент.

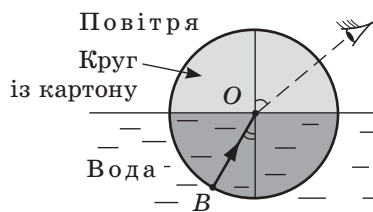


Рис. 4

**\* Завдання «із зірочкою»**

Для одного з дослідів оцініть відносну похибку експерименту, скориставшись формулою:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{n_{\text{вим}}}{n} \right| \cdot 100\%,$$

де  $n_{\text{вим}}$  — отримане під час експерименту значення показника заломлення скла відносно повітря;  $n$  — табличне значення абсолютного показника заломлення скла, з якого виготовлена пластинка (з'ясуєте у вчителя).

## § 13. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА. СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД ПРИРОДНОГО СВІТЛА. КОЛЬОРИ

Згадайте: сонячний літній день — і раптом на небі з'явилася хмаринка, пішов дощик, який начебто «не помічає», що сонце продовжує світити. Такий дощ у народі називають сліпим. Дощик іще не встиг закінчитись, а на небі вже засяяла різнокольорова веселка (рис. 13.1). Чому вона з'явилася?



**Рис. 13.1.** Веселку можна спостерігати, зокрема, в бризках фонтана або водоспаду

### 1 Розкладаємо сонячне світло у спектр

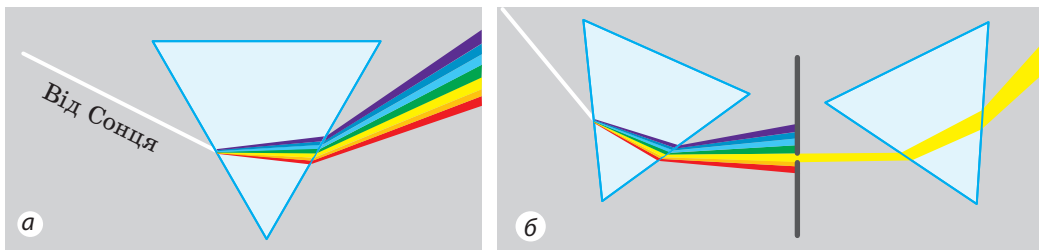
Ще в давнину було помічено, що пучок сонячного світла, пройшовши крізь скляну призму, стає різнокольоровим. Вважалося, що причина цього явища криється у властивості призми забарвлювати світло. Чи так це насправді, з'ясував у 1665 р. видатний англійський учений *Ісаак Ньютон* (1643–1727), провівши серію цікавих дослідів.

Для отримання вузького пучка сонячного світла Ньютон зробив у віконниці невеликий круглий отвір. Коли перед отвором він установлював скляну призму, на протилежній стіні з'являлася різнокольорова смужка, яку вчений назвав **спектром**. На смужці (як і у веселці) Ньютон виділив сім кольорів: *червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий* (рис. 13.2, *а*).

Потім учений за допомогою екрана з отвором виділяв із широкого різнокольорового пучка світла вузькі одноколірні (монохроматичні) пучки та знову спрямовував їх на призму. Такі пучки відхилялися призмою, але вже не розкладались у спектр (рис. 13.2, *б*). При цьому найбільше відхилявся фіолетовий пучок світла, а найменше — червоний.

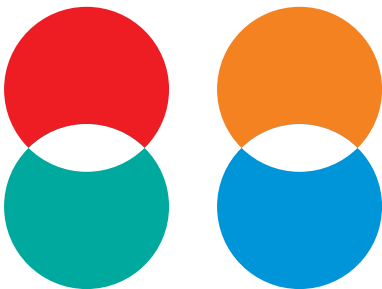
Результати дослідів дозволили Ньютону дійти таких *висновків*:

- 1) пучок білого (сонячного) світла складається зі світла різних кольорів;
- 2) призма не «фарбує» біле світло, а розділяє його (розкладає в спектр) через різне заломлення світла різного кольору.

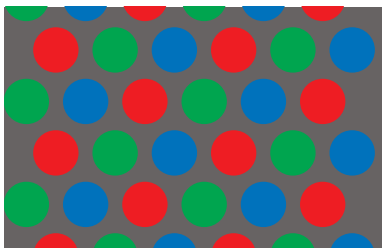


**Рис. 13.2.** Схема дослідів І. Ньютона із з'ясування спектрального складу світла

Зіставте рис. 13.1 і 13.2: кольори веселки — то і є кольори спектра. І це не є дивним, бо насправді веселка — це величезний спектр сонячного світла. Одна із причин виникнення веселки полягає в тому, що безліч маленьких краплинок води заломлюють біле сонячне світло.



**Рис. 13.3.** Деякі додаткові кольори



**Рис. 13.4.** Якщо подивитися через лупу на екран комп'ютера, побачимо безліч дрібних кругів червоного, зеленого та синього кольорів

## \* 2 Дізнаємось про дисперсію світла

Досліди Ньютона продемонстрували, зокрема, що, заломлюючись у скляній призмі, пучки фіолетового світла завжди відхиляються більше, ніж пучки червоного. Це означає, що *для світла різного кольору показник заломлення скла є різним*. Саме тому пучок білого світла й розкладається у спектр.

Явище розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю показника заломлення середовища від кольору світла, називають **дисперсією світла**.

Для більшості прозорих середовищ найбільший показник заломлення має світло фіолетового кольору, найменший — червоного.

? Світло якого кольору — фіолетового чи червоного — поширюється в склі швидше? *Підказка:* згадайте, як показник заломлення середовища залежить від швидкості поширення світла в цьому середовищі.

## 3 Характеризуємо кольори

У спектрі сонячного світла традиційно виділяють сім кольорів, можна виділити й більше. Але ви ніколи не зможете виділити, наприклад, коричневий або бузковий колір. Ці кольори є *складними* — вони утворюються внаслідок *накладання (змішування) спектральних (чистих) кольорів у різних пропорціях*. Деякі спектральні кольори в разі накладання один на одного утворюють білий колір. Такі пари спектральних кольорів називають *додатковими* (рис. 13.3).

Для зору людини особливе значення мають **три основні спектральні кольори: червоний, зелений і синій**: накладаючись, ці кольори дають відчуття найрізноманітніших кольорів і відтінків.

На накладанні трьох основних спектральних кольорів у різних пропорціях ґрунтується кольорове зображення на екрані комп'ютера, телевізора, телефону (рис. 13.4).





**Рис. 13.5.** Завдяки тому що різні тіла по-різному відбивають, заломлюють і поглинають сонячне світло, ми бачимо навколишній світ різнокольоровим

#### 4 З'ясуємо, чому світ є різнокольоровим

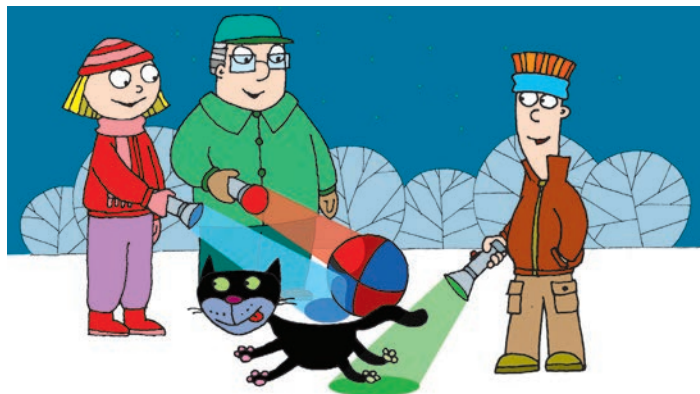
Знаючи, що біле світло є складеним, можна пояснити, чому навколишній світ, освітлений лише одним джерелом білого світла — Сонцем, ми бачимо різнокольоровим (рис. 13.5).

Так, поверхня аркуша офісного паперу однаково добре відбиває промені всіх кольорів, тому аркуш, освітлений білим світлом, здається нам білим. Синій наплічник, освітлений тим самим білим світлом, переважно відбиває промені синього кольору, а решту поглинає.

**?** Як ви вважаєте, який колір переважно відбивають пелюстки соняшників? листя рослин?

Синє світло, спрямоване на червоні пелюстки троянди, майже цілком поглинеться ними, бо пелюстки відбивають переважно червоні промені, а решту — поглинають. Тому троянда, освітлена синім світлом, здаватиметься нам практично чорною. Якщо ж синім світлом освітити білий сніг, то він здаватиметься нам синім, адже білий сніг відбиває промені всіх кольорів (у тому числі й сині). А от чорна шерсть kota добре поглинає всі промені, тому, хоч яким світлом ми його освітимо, кіт однаково здаватиметься чорним (рис. 13.6).

*Зверніть увагу!* Оскільки колір тіла залежить від характеристики падаючого світла, в темряві поняття кольору позбавлене будь-якого сенсу.



**Рис. 13.6.** Колір тіла залежить як від оптичних властивостей його поверхні, так і від характеристик падаючого світла



### Підбиваємо підсумки

Пучок білого світла складається зі світла різних кольорів. Виділяють сім основних спектральних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий. Показник заломлення світла, а отже, швидкість поширення світла в середовищі залежать від кольору світла.

\* Залежність показника заломлення середовища від кольору світла називають дисперсією світла. ← Ми бачимо навколишній світ різнокольоровим завдяки тому, що різні тіла по-різному відбивають, заломлюють і поглинають світло.



### Контрольні запитання

1. Опишіть досліди І. Ньютона щодо встановлення спектрального складу світла. 2. Назвіть сім спектральних кольорів. 3. Світло якого кольору найбільше заломлюється в речовині? найменше заломлюється? \*4. Дайте означення дисперсії світла. Яке природне явище пов'язане з дисперсією? 5. Які кольори називають додатковими? 6. Назвіть три основні кольори спектра. Чому їх так називають? 7. Чому навколишній світ ми бачимо різнокольоровим?



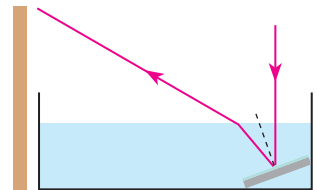
### Вправа № 13

1. Якими здаватимуться чорні літери на білому папері, якщо дивитися на них крізь зелене скло? Яким при цьому здаватиметься колір паперу? 2. Світло яких кольорів проходить крізь синє скло? поглинається ним? 3. Через скло якого кольору не можна побачити текст, написаний фіолетовим чорнилом на білому папері? 4. У воді поширюються пучки світла червоного, оранжевого та блакитного кольорів. Швидкість поширення якого з пучків є найбільшою? 5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, чому небо блакитне; чому Сонце на заході часто буває червоним.



### Експериментальне завдання

«Творці райдуги». Наповніть неглибоку посудину водою та поставте її біля світлої стіни. На дно посудини помістіть плоске дзеркало (див. рисунок). Спрямуйте на дзеркало пучок світла — на стіні з'явиться «сонячний зайчик». Розгляньте його та поясніть спостережуване явище.



## Фізика і техніка в Україні

**Київський національний університет ім. Тараса Шевченка** (КНУ) заснований 8 листопада 1833 р. як Імператорський університет Святого Володимира. Перший ректор університету — видатний учений-енциклопедист *Михайло Олександрович Максимович*.

Із КНУ пов'язані імена відомих учених — математиків, фізиків, кібернетиків, астрономів: Д. О. Граве, М. П. Кравчука, Г. В. Пфейффера, М. М. Боголюбова, В. М. Глушкова, А. В. Скорохода, Й. І. Гіхмана, Б. В. Гнеденка, В. С. Михалевича, М. П. Авенаріуса, М. М. Шіллера, Й. Й. Косоногова, О. Г. Ситенка, В. Є. Лашкарьова, Р. П. Фогеля, М. Ф. Хандрикова, С. К. Всехсвятського.

У світі відомі наукові школи Київського університету — алгебраїчна, теорії ймовірностей та математичної статистики, механіки, фізики напівпровідників, фізичної електроніки та фізики поверхні, металогенічна, оптики нових матеріалів та ін. Із 2008 р. ректор КНУ — академік НАНУ і НАПНУ, Герой України *Леонід Васильович Губерський*.

## § 14. ЛІНЗИ. ОПТИЧНА СИЛА ЛІНЗИ

На уроках біології ви, напевно, працювали з мікроскопом. Скоріш за все, ви знайоми з біноклем, підзорною трубою, телескопом, користувалися фотоапаратом. Дехто з вас носить окуляри. Усі ці пристрої мають спільне — їхньою основною частиною є лінза. Про те, яке значення мають ці пристрої в житті людини, ви можете розповісти й самі, а от про те, що таке лінза, які існують види лінз та які їхні властивості, дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Розрізняємо лінзи

**Лінза** — прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями\*.

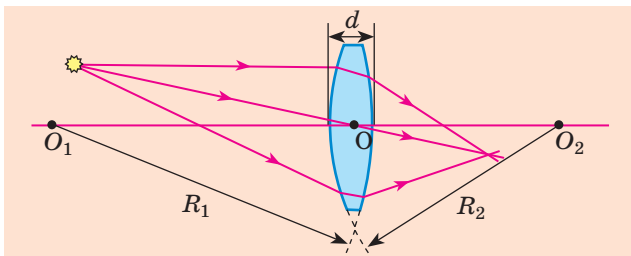
За формою лінзи поділяють на *опуклі* (рис. 14.1) й *увігнуті* (рис. 14.2).

Якщо товщина  $d$  лінзи в багато разів менша від радіусів сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, таку лінзу називають *тонкою*. Далі розглядатимемо тільки тонкі лінзи.

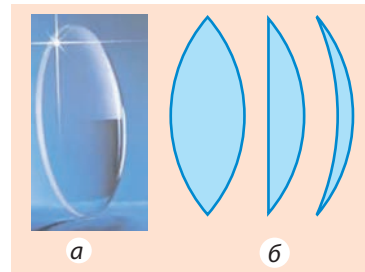
Пряму, яка проходить через центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називають **головною оптичною віссю лінзи** (рис. 14.3).

Якщо на лінзу спрямувати пучок світлових променів, вони заломляться в ній, тобто змінять свій напрямок. Разом із тим на головній оптичній осі лінзи є точка, яку промінь світла проходить не заломлюючись. Цю точку називають **оптичним центром лінзи** (див. рис. 14.3).

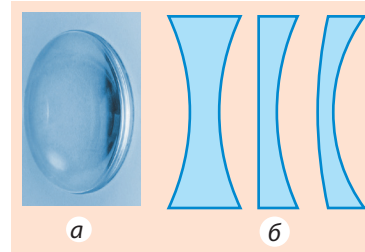
Спрямуємо на лінзу пучок променів, *паралельних їй головній оптичній осі*. Якщо ці промені, пройшовши крізь лінзу, йдуть збіжним пучком, то така лінза є **збиральною**. Точку  $F$ , у якій при цьому перетинаються



\* Одна з поверхонь лінзи може бути *площиною*, бо площину можна розглядати як сферу нескінченного радіуса. Лінзи також бувають *циліндричними*, але зустрічаються такі лінзи рідко.

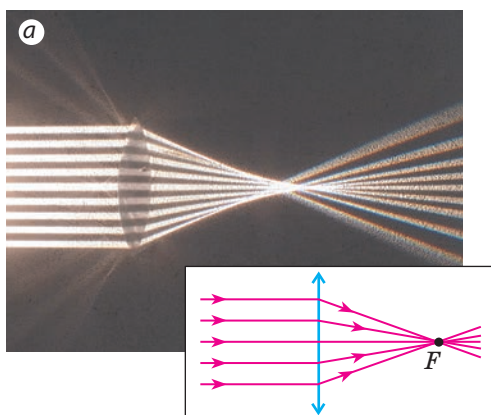


**Рис. 14.1.** Опукла лінза — лінза, товщина якої посередині більша, ніж біля країв:  $a$  — вигляд;  $b$  — різні опуклі лінзи в розрізі

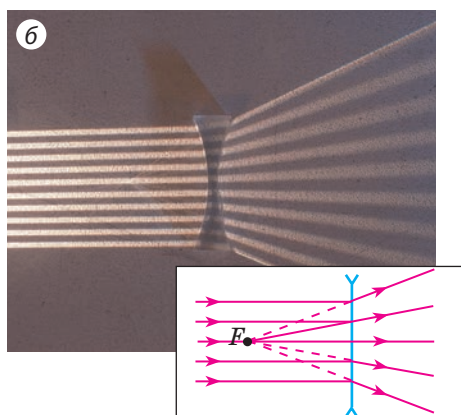


**Рис. 14.2.** Увігнута лінза — лінза, товщина якої посередині менша, ніж біля країв:  $a$  — вигляд;  $b$  — різні увігнуті лінзи в розрізі

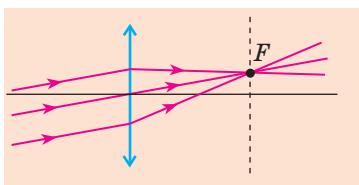
**Рис. 14.3.** Тонка сферична лінза:  $O_1O_2$  — головна оптична вісь лінзи;  $d$  — товщина лінзи;  $R_1, R_2$  — радіуси сферичних поверхонь, які обмежують лінзу;  $O$  — оптичний центр лінзи;



**Рис. 14.4.** Хід променів після заломлення в збиральній лінзі. Точка  $F$  — дійсний головний фокус лінзи



**Рис. 14.5.** Хід променів після заломлення в розсіювальній лінзі. Точка  $F$  — уявний головний фокус лінзи



**Рис. 14.6.** Хід паралельних променів після заломлення у збиральній лінзі

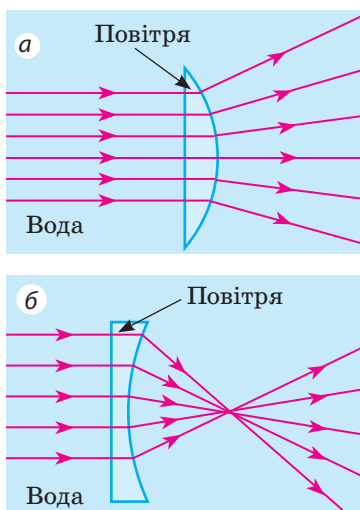
заломлені промені, називають **дійсним головним фокусом лінзи** (рис. 14.4).

Лінза є **розсіювальною**, якщо промені, паралельні її головній оптичній осі, пройшовши крізь лінзу, йдуть розбіжним пучком. Точку  $F$ , у якій перетинаються продовження заломлених променів, називають **уявним головним фокусом лінзи** (рис. 14.5).

*Зверніть увагу:* будь-який пучок *паралельних променів*, навіть якщо ці промені не є паралельними головній оптичній осі, після заломлення у збиральній лінзі завжди перетинаються в одній точці (рис. 14.6) (якщо лінза розсіювальна, в одній точці перетинаються продовження заломлених променів).

Якщо оптична густина матеріалу, з якого виготовлена лінза, більша за оптичну густина середовища ( $n_{\text{л}} > n_{\text{с}}$ ), то опукла лінза збиратиме промені (тобто буде збиральною), а увігнута лінза розсіюватиме промені (тобто буде розсіювальною).

Якщо оптична густина матеріалу, з якого виготовлена лінза, менша за оптичну густина середовища ( $n_{\text{л}} < n_{\text{с}}$ ), то опукла лінза буде розсіювальною (рис. 14.7, а), а увігнута лінза — збиральною (рис. 14.7, б).



**Рис. 14.7.** Опукла (а) й увігнута (б) повітряні лінзи у воді

**?** Як ви вважаєте, збиральною чи розсіювальною буде опукла скляна лінза в повітрі? опукла повітряна лінза у склі?

## 2 Даємо означення оптичної сили лінзи

Незалежно від форми кожна лінза має два головні фокуси\*, розташовані на однаковій відстані від оптичного центра лінзи (див. рис. 14.8).

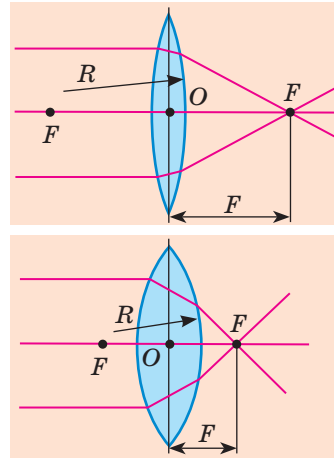
Відстань від оптичного центра лінзи до головного фокуса називають **фокусною відстанню лінзи**.

Фокусну відстань (як і фокус) позначають символом  $F$ . *Одиниця фокусної відстані в СІ — метр:*

$$[F] = 1 \text{ м.}$$

Фокусну відстань збиральної лінзи домовилися вважати додатною, а розсіювальної — від'ємною. Очевидно, що чим сильніше заломлювальні властивості має лінза, тим меншою за модулем є її фокусна відстань (рис. 14.8).

Фізичну величину, яка характеризує лінзу та є оберненою до фокусної відстані лінзи, називають **оптичною силою лінзи**.



**Рис. 14.8.** Чим меншими є радіуси  $R$  сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, тим сильніше ця лінза заломлює світло, отже, тим менша її фокусна відстань  $F$

Оптичну силу лінзи позначають символом  $D$  і обчислюють за формулою:

$$D = \frac{1}{F},$$

де  $F$  — фокусна відстань.

*Одиниця оптичної сили — діоптрія:*  $[D] = 1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

**1 діоптрія** — це оптична сила лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 м.

Оптична сила збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної лінзи — від'ємною.



### Підбиваємо підсумки

Прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями, називають лінзою.

Лінза є збиральною, якщо пучок паралельних променів, що падає на неї, після заломлення в лінзі перетинається в одній точці. Цю точку називають дійсним фокусом лінзи. Лінза є розсіювальною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення йдуть розбіжним пучком, а продовження заломлених променів перетинаються в уявному фокусі лінзи.

Фізичну величину, яка характеризує заломлювальні властивості лінзи та є оберненою до її фокусної відстані, називають оптичною силою лінзи:

$D = \frac{1}{F}$ . Оптична сила лінзи вимірюється в діоптріях:  $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

\* Надалі головний фокус лінзи зазвичай називатимемо *фокусом лінзи*.



### Контрольні запитання

1. Дайте означення лінзи.
2. Які види лінз вам відомі?
3. Чим розсіювальна лінза відрізняється від збиральної?
4. Що називають дійсним фокусом лінзи?
5. Чому фокус розсіювальної лінзи називають уявним?
6. Що називають фокусною відстанню лінзи?
7. Дайте означення оптичної сили лінзи. У яких одиницях її вимірюють?
8. Оптичну силу якої лінзи взято за одиницю?



### Вправа № 14

1. Оптична сила однієї лінзи дорівнює  $-2$  дптр, а другої  $+2$  дптр. Чим відрізняються ці лінзи?
2. Фокусна відстань однієї лінзи  $+0,5$  м, а другої  $+1$  м. Яка лінза має більшу оптичну силу?
3. Оптична сила лінзи дорівнює  $-1,6$  дптр. Якою є фокусна відстань цієї лінзи? Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
4. Дві збиральні лінзи виготовлені з одного сорту скла. Як на дотик визначити, яка лінза має більшу оптичну силу?
5. На лінзу спрямували паралельний пучок світла (рис. 1). Визначте, яка це лінза. Перенесіть рисунок до зошита. Позначте оптичний центр і фокус лінзи. Виміряйте фокусну відстань та визначте оптичну силу лінзи.
6. У льоду є порожнина у вигляді увігнутої лінзи. Ця лінза збиратиме чи розсіюватиме світло? Обґрунтуйте свою відповідь.
7. Які із зображених на рис. 2 трикутників є подібними? Визначте довжину відрізків  $S_1A_1$  і  $OF$ , якщо  $AO = 10$  см,  $SA = 2$  см,  $OA_1 = 6$  см.

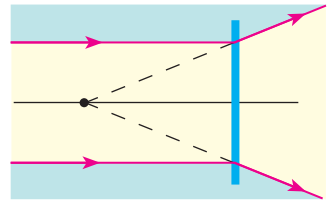


Рис. 1

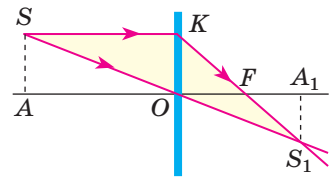


Рис. 2



### Експериментальне завдання

Запропонуйте метод вимірювання фокусної відстані та оптичної сили збиральної лінзи за допомогою лінійки. Проведіть вимірювання.

*Підказка:* промені, які йдуть від віддаленого предмета, є паралельними.

### Фізика і техніка в Україні

**Інститут фізики НАНУ** (Київ) — провідна наукова установа з вирішення фундаментальних проблем експериментальної та теоретичної фізики.

Широко відомі досягнення вчених інституту в галузі фізики твердого тіла й рідких кристалів, оптики, фізичної та квантової електроніки, ядерної енергетики, нанофізики тощо. Співробітники інституту стали авторами шести зареєстрованих наукових відкриттів.

З інститутом пов'язані імена таких видатних науковців, як В. П. Линник, Г. В. Пфейффер, В. Є. Лашкар'єв, С. І. Пекар, М. В. Пасічник, О. І. Лейпунський, Н. Д. Моргуліс, Г. Д. Лаτιшев, О. С. Давидов, А. Ф. Прихотько, М. Т. Шпак та ін.

На базі структурних підрозділів Інституту фізики в складі Академії наук було створено Інститут металофізики, Інститут напівпровідників, Інститут теоретичної фізики, Інститут ядерних досліджень, Інститут прикладної оптики НАНУ. Сьогодні в Інституті фізики працюють видатні вчені, академіки НАНУ: *А. Г. Наумовець* (фізична електроніка) — віце-президент НАНУ, *М. С. Бродин* (нелінійна оптика) — почесний директор інституту, *Л. П. Яценко* (когерентна і квантова оптика) — директор інституту з 2008 р.

## § 15. ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ У ЛІНЗАХ. ДЕЯКІ ОПТИЧНІ ПРИСТРОЇ. ФОРМУЛА ТОНКОЇ ЛІНЗИ

Головна властивість лінз полягає в тому, що лінзи дають зображення точки, а відповідно, й предмета як сукупності точок (рис. 15.1).

Залежно від відстані між предметом і лінзою зображення предмета може бути більшим або меншим, ніж сам предмет, уявним чи дійсним.

З'ясуємо, за яких умов за допомогою лінзи утворюються ті чи інші зображення, та розглянемо прийоми їх побудови.



Рис. 15.1. Отримання зображення полум'я свічки за допомогою збиральної лінзи

### 1 Шукаємо «зручні промені»

Будь-який предмет можна подати як сукупність точок. Кожна точка предмета випускає (або відбиває) промені в усіх напрямках. У створенні зображення в лінзі бере участь безліч променів, однак для побудови зображення деякої точки  $S$  досить знайти точку перетину будь-яких двох променів, що виходять із точки  $S$  і проходять крізь лінзу. Зазвичай для цього обирають два з трьох «зручних променів» (рис. 15.2).

Точка  $S_1$  буде **дійсним зображенням** точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються *самі* заломлені промені (рис. 15.2, *а*). Точка  $S_1$  буде **уявним зображенням** точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються *продовження* заломлених променів (рис. 15.2, *б*).

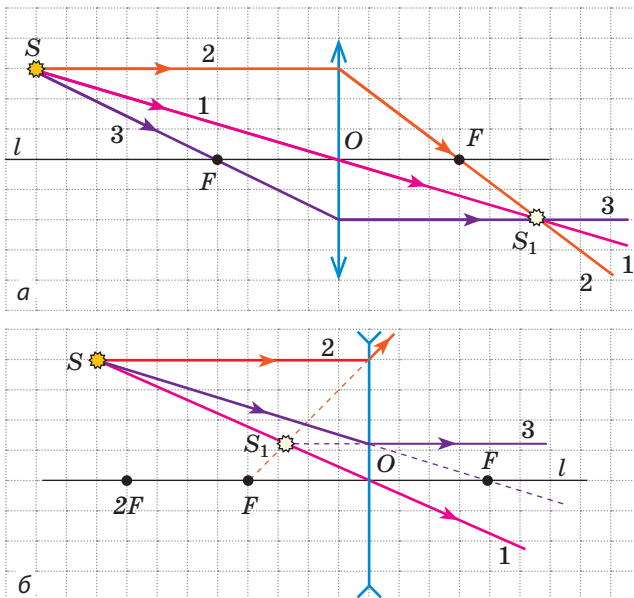
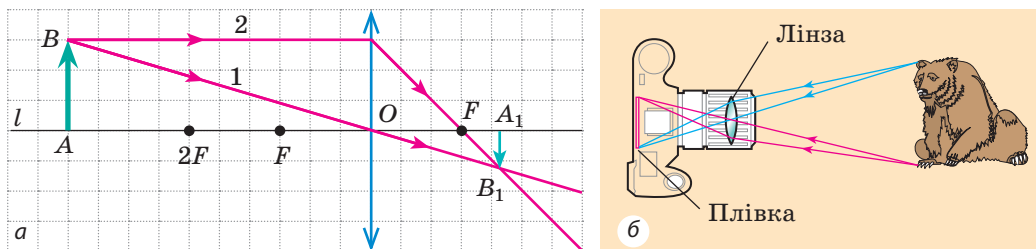


Рис. 15.2. Три найпростіші в побудові промені («зручні промені»):

1 — промінь, який проходить через оптичний центр  $O$  лінзи, — не заломлюється та не змінює свого напрямку; 2 — промінь, паралельний головній оптичній осі  $l$  лінзи, — після заломлення в лінзі йде через фокус  $F$  (а) або через фокус  $F$  йде його продовження (б); 3 — промінь, який проходить через фокус  $F$ , — після заломлення в лінзі йде паралельно головній оптичній осі  $l$  лінзи (а, б)



**Рис. 15.3.** *a* — побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  у збиральній лінзі: предмет  $AB$  розташований за подвійним фокусом лінзи; *б* — хід променів у фотоапараті

## 2 Будуємо зображення предмета, яке дає лінза

Розглянемо усі можливі випадки розташування предмета  $AB$  відносно збиральної лінзи й доведемо, що розміри та вид зображення залежать від відстані між предметом і лінзою.

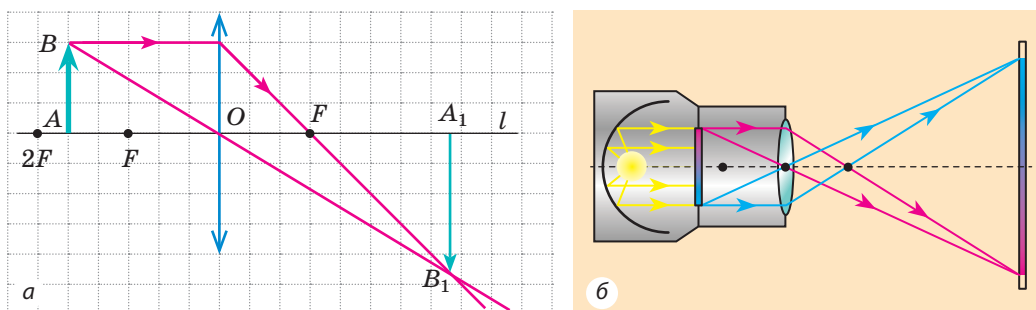
1. Предмет розташований за подвійним фокусом збиральної лінзи (рис. 15.3, *a*). Спочатку побудуємо зображення точки  $B$ . Для цього скористаємося двома променями — 1 і 2. Після заломлення в лінзі вони перетнуться в точці  $B_1$ . Отже, точка  $B_1$  є дійсним зображенням точки  $B$ . Для побудови зображення точки  $A$  опустимо з точки  $B_1$  перпендикуляр на головну оптичну вісь  $l$ . Точка  $A_1$  перетину перпендикуляра та осі  $l$  і є зображенням точки  $A$ .

Отже,  $A_1B_1$  — зображення предмета  $AB$ . Бачимо, що це зображення є дійсним, зменшеним, оберненим. Таке зображення виходить, наприклад, на сітківці ока або плівці фотоапарата (рис. 15.3, *б*).

2. Предмет розташований між фокусом і подвійним фокусом збиральної лінзи (рис. 15.4, *a*). Зображення предмета є дійсним, збільшеним, оберненим. Таке зображення дозволяє одержати проекційна апаратура на екрані (рис. 15.4, *б*).

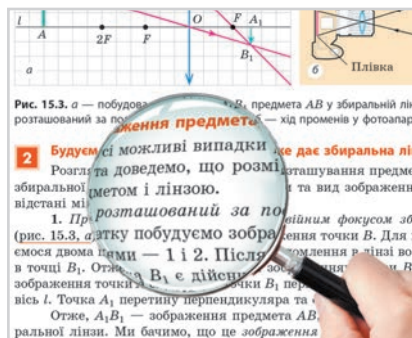
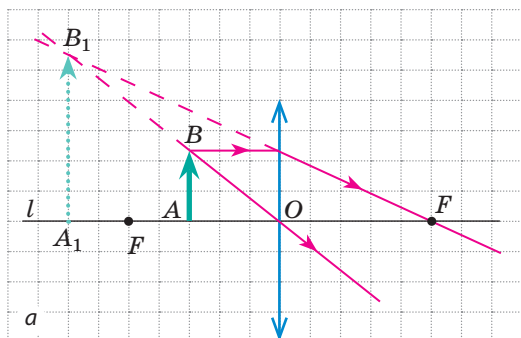
3. Предмет розташований між фокусом і збиральною лінзою (рис. 15.5, *a*). Після заломлення в лінзі промені, які вийшли з точки  $B$ , йдуть розбіжним пучком. Однак їхні продовження перетинаються в точці  $B$ .

У даному випадку зображення предмета є уявним, збільшеним, прямим. Це зображення розташоване по той самий бік від лінзи, що й предмет,



**Рис. 15.4.** *a* — побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  у збиральній лінзі: предмет  $AB$  розташований між фокусом і подвійним фокусом лінзи; *б* — хід променів у проекційному апараті

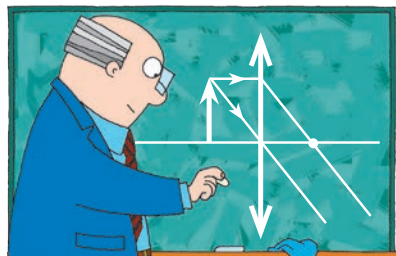




**Рис. 15.5.** а — побудова зображення  $A_1B_1$  предмета у збиральній лінзі: предмет  $AB$  розташований між лінзою та її фокусом; б — за допомогою лупи можна отримати збільшене зображення предмета й розглянути його детальніше

тому ми не можемо побачити його на екрані, але бачимо, дивлячись на предмет крізь лінзу. Саме таке зображення дає короткофокусна збиральна лінза — лупа (рис. 15.5, б).

4. *Предмет розташований на фокусній відстані від збиральної лінзи.* Після заломлення усі промені йдуть паралельним пучком (рис. 15.6), отже, в цьому випадку *ані дійсного, ані уявного зображення ми не отримаємо.*

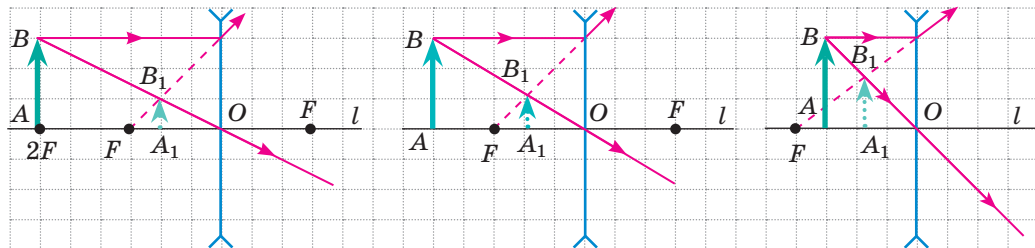


**Рис. 15.6.** Якщо предмет розташований у фокусі збиральної лінзи, ми не отримаємо його зображення

**?** Яким буде зображення, якщо предмет розташувати в подвійному фокусі лінзи? Побудуйте це зображення та підтвердьте або спростуйте своє припущення.

Уважно розгляньте рис. 15.7, на якому показано побудову зображень предмета, одержаних за допомогою розсіювальної лінзи. Бачимо, що *розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене, пряме зображення*, розташоване з того самого боку від лінзи, що й сам предмет.

**?** З'ясуйте, чи отримаємо ми зображення, якщо розташуємо предмет у фокусі розсіювальної лінзи.



**Рис. 15.7.** Розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене, пряме зображення

Найчастіше буває так, що предмет є більшим за лінзу або частина лінзи закрита непрозорим екраном (наприклад, лінза об'єктива фотоапарата). Чи змінюється при цьому вигляд зображення? Звичайно ж ні. Адже від кожної точки предмета на лінзу падає безліч променів, і всі вони збираються у відповідній точці зображення. Закривання частини лінзи спричинить лише те, що енергія, яка потрапляє в кожну точку зображення, зменшиться. Зображення буде менш яскравим, проте ані його вигляд, ані місце розташування не зміняться. Саме тому, будуючи зображення, ми можемо використовувати всі зручні промені, навіть ті, які не проходять крізь лінзу (рис. 15.8).

### 3 Отримуємо формулу тонкої лінзи

Побудуємо зображення предмета у збиральній лінзі (рис. 15.9).

Розглянемо прямокутні трикутники  $FOC$  і  $FA_1B_1$ . Ці трикутники подібні, тому  $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$ , або  $\frac{h}{H} = \frac{f}{f-F}$  (1).

Трикутники  $BAO$  і  $B_1A_1O$  теж подібні, тому  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$ , або  $\frac{h}{H} = \frac{d}{f}$  (2).

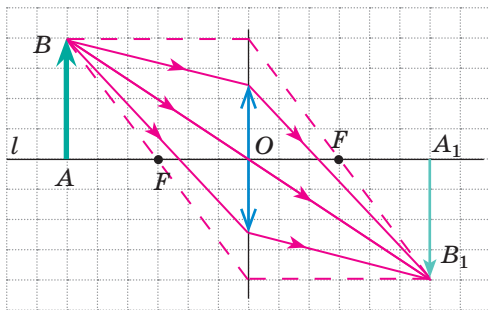
Прирівнявши праві частини рівностей (1) і (2), маємо  $\frac{f}{f-F} = \frac{d}{f}$ , тобто  $Ff = df - dF$ , або  $df = Ff + dF$ . Поділивши обидві частини останньої рівності на  $fdF$ , отримуємо **формулу тонкої лінзи**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \text{ або } D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

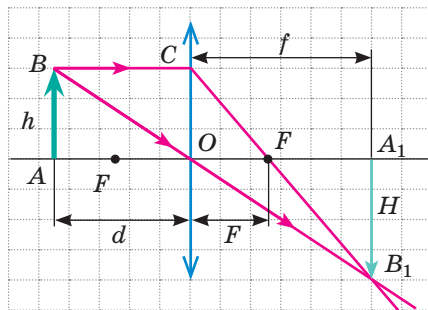
де  $D = \frac{1}{F}$  — оптична сила лінзи.

Під час розв'язування задач слід мати на увазі:

- відстань  $f$  (від лінзи до зображення) необхідно брати зі знаком «-», якщо зображення є уявним, і зі знаком «+», якщо зображення є дійсним;
- фокусна відстань  $F$  збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною;
- збільшення  $\Gamma$  лінзи обчислюють за формулою:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \left| \frac{f}{d} \right|$ .



**Рис. 15.8.** Побудова зображення предмета у випадку, коли предмет є значно більшим за лінзу



**Рис. 15.9.** До отримання формули тонкої лінзи:  $h$  — висота предмета;  $H$  — висота зображення;  $d$  — відстань від предмета до лінзи;  $f$  — відстань від лінзи до зображення;  $F$  — фокусна відстань

**4 Учимся розв'язувати задачі**

**Задача 1.** Розглядаючи монету за допомогою лупи, оптична сила якої +10 дптр, хлопчик розташував монету на відстані 6 см від лупи. Визначте: 1) фокусну відстань лінзи; 2) на якій відстані від лупи хлопчик спостерігав зображення монети; 3) яким є це зображення — дійсним чи уявним; 4) яке збільшення дає лупа.

*Аналіз фізичної проблеми.* Лупу можна вважати тонкою лінзою, тому скористаємося формулою тонкої лінзи. Фокусну відстань знайдемо, скориставшись означенням оптичної сили лінзи.

<p><b>Дано:</b>  <math>d = 6 \text{ см} = 0,06 \text{ м}</math>  <math>D = +10 \text{ дптр}</math></p>	<p><i>Пошук математичної моделі, розв'язання</i></p> <p>За означенням <math>D = \frac{1}{F} \Rightarrow F = \frac{1}{D}</math>.</p>
<p><b>Знайти:</b>  <math>F</math> — ?  <math>f</math> — ?  <math>\Gamma</math> — ?</p>	<p>За формулою тонкої лінзи: <math>\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}</math>,                  або <math>\frac{1}{f} = \frac{d-F}{Fd}</math>. Отже, <math>f = \frac{Fd}{d-F}</math>.</p> <p>Знаючи відстань <math>f</math>, визначимо збільшення: <math>\Gamma = \frac{H}{h} = \left  \frac{f}{d} \right </math>.</p>
<p>Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:</p> <p><math>[F] = \frac{1}{\text{дптр}} = \frac{1}{\text{м}^{-1}} = \text{м}, F = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ (м)}</math>;</p> <p><math>[f] = \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} - \text{м}} = \frac{\text{м}^2}{\text{м}} = \text{м}, f = \frac{0,1 \cdot 0,06}{0,06 - 0,1} = -0,15 \text{ (м)}; \Gamma = \frac{0,15}{0,06} = \frac{15}{6} = \frac{5}{2} = 2,5</math>.</p> <p>Знак «-» перед значенням <math>f</math> говорить про те, що зображення є уявним.</p> <p><b>Відповідь:</b> <math>F = 10 \text{ см}</math>; <math>f = -15 \text{ см}</math>; зображення уявне; <math>\Gamma = 2,5</math>.</p>	



**Підбиваємо підсумки**

Залежно від типу лінзи (збиральна чи розсіювальна) і місця розташування предмета відносно цієї лінзи одержують різні зображення предмета:

Місце розташування предмета	Характеристика зображення в лінзі	
	збиральній	розсіювальній
За подвійним фокусом лінзи ( $d > 2F$ )	дійсне, зменшене, обернене	уявне, зменшене, пряме
У подвійному фокусі ( $d = 2F$ )	дійсне, рівне, обернене	
Між фокусом і подвійним фокусом лінзи ( $F < d < 2F$ )	дійсне, збільшене, обернене	
У фокусі лінзи ( $d = F$ )	зображення не існує	
Між лінзою і фокусом ( $d < F$ )	уявне, збільшене, пряме	

Відстань  $d$  від предмета до лінзи, відстань  $f$  від лінзи до зображення та фокусна відстань  $F$  пов'язані формулою тонкої лінзи:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .



### Контрольні запитання

1. Які промені зручно використовувати для побудови зображення, одержуваного за допомогою лінзи? 2. Чи можна одержати дійсне зображення за допомогою розсіювальної лінзи? уявне зображення — за допомогою збиральної лінзи? 3. У якому випадку зображення предмета можна побачити на екрані — коли це зображення є дійсним чи коли воно є уявним? 4. Як за видом зображення визначити, збиральною чи розсіювальною є лінза? 5. Назвіть оптичні пристрої, в яких є лінзи. 6. Які фізичні величини пов'язує формула тонкої лінзи? Яких правил слід дотримуватися, застосовуючи цю формулу?



### Вправа № 15

1. Перенесіть рис. 1, а, б до зошита і для кожного випадку побудуйте зображення предмета  $AB$  у збиральній лінзі. Схарактеризуйте зображення.

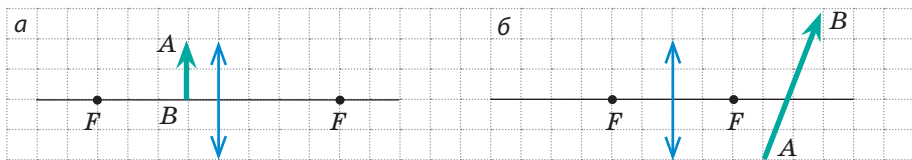


Рис. 1

2. Оптична сила лінзи  $+5$  дптр. На якій відстані від лінзи потрібно розташувати запалену свічку, щоб одержати зображення полум'я свічки в натуральну величину?
3. Предмет розташований на відстані 1 м від лінзи. Уявне зображення предмета розташовано на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
4. На аркуш із друкованим текстом потрапила крапля прозорого клею. Чому літери, що опинилися під краплею, здаються більшими, ніж сусідні?
5. За допомогою лінзи отримали чітке зображення предмета на екрані. Визначте: 1) оптичну силу лінзи, якщо предмет розташований на відстані 60 см від лінзи, а відстань між предметом і екраном дорівнює 90 см; 2) висоту предмета, якщо висота його зображення 5 см.
6. Перенесіть рис. 2, а–в до зошита і для кожного випадку визначте розташування оптичного центра та фокусів лінзи, тип лінзи, вид зображення. ( $KN$  — оптична вісь лінзи;  $S$  — світна точка;  $S_1$  — зображення світної точки  $S$ ).

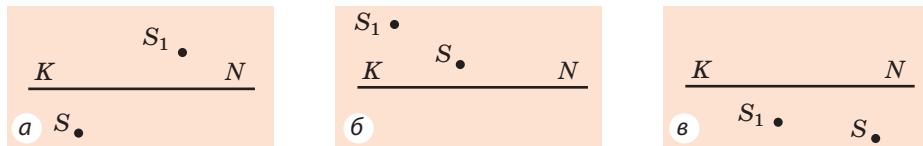


Рис. 2

7. Визначте оптичну силу лупи, яка дає збільшене в 6 разів зображення, розташоване на відстані 20 см від лупи.
8. Як змінюється та в якому напрямку рухається зображення предмета, якщо предмет рухається від нескінченності до лінзи?
9. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про історію фотоапарата. Зробіть комп'ютерну презентацію.



**Тема.** Визначення фокусної відстані та оптичної сили тонкої лінзи.

**Мета:** визначити фокусну відстань та оптичну силу тонкої збиральної лінзи.

**Обладнання:** збиральна лінза на підставці, екран, джерело світла (свічка або електрична лампа), мірна стрічка.

## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

### II Підготовка до експерименту

1. Перед тим як виконувати роботу згадайте: 1) вимоги безпеки під час роботи зі скляними та вогнебезпечними предметами; 2) формулу тонкої лінзи; 3) означення оптичної сили лінзи.
2. Проаналізуйте формулу тонкої лінзи, подумайте, які вимірювання вам слід зробити, щоб визначити фокусну відстань лінзи.

### ▶▶ Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника). Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.*

1. Розташували лінзу між джерелом світла та екраном, дістаньте на екрані чітке зменшене зображення джерела світла.
2. Виміряйте відстань  $d$  від джерела світла до лінзи та відстань  $f$  від лінзи до екрана.
3. Пересуваючи лінзу, дістаньте на екрані чітке збільшене зображення джерела світла.
4. Знову виміряйте відстань  $d$  від джерела світла до лінзи та відстань  $f$  від лінзи до екрана.

### ▶ Опрацювання результатів експерименту

1. Для кожного дослідів визначте:
  - 1) фокусну відстань лінзи (скориставшись формулою тонкої лінзи);
  - 2) оптичну силу лінзи (скориставшись означенням оптичної сили).
2. Закінчіть заповнення таблиці.

Номер дослідів	Відстань від предмета до лінзи $d$ , м	Відстань від лінзи до екрана $f$ , м	Фокусна відстань лінзи $F$ , м	Оптична сила лінзи $D$ , дптр
1				
2				

### □ Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому: 1) порівняйте значення фокусної відстані, одержані вами в різних дослідів; 2) дізнайтесь у вчителя значення оптичної сили лінзи, наведене в паспорті, та порівняйте його зі значеннями оптичної сили, отриманими в ході експерименту; 3) зазначте причини можливої розбіжності результатів.

**+ Творче завдання**

Визначте фокусну відстань лінзи ще двома методами: 1) отримавши на екрані зображення віддаленого предмета (наприклад, дерева за вікном); 2) отримавши на екрані зображення джерела світла, яке за розміром дорівнює розмірам самого джерела. Які вимірювання та розрахунки ви виконували в кожному випадку?

**\* Завдання «із зірочкою»**

Оцініть відносну похибку одного з експериментів, скориставшись формулою:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{D_{\text{вим}}}{D_{\text{пасп}}} \right| \cdot 100\%$ , де  $D_{\text{вим}}$  — отримане під час експерименту значення оптичної сили лінзи;  $D_{\text{пасп}}$  — значення оптичної сили лінзи за паспортом пристрою.

## § 16. ОКО ЯК ОПТИЧНА СИСТЕМА. ЗІР І БАЧЕННЯ. ОКУЛЯРИ. ВАДИ ЗОРУ ТА ЇХ КОРЕКЦІЯ

Органом зору людини є око — один із найдосконаліших і водночас найпростіших оптичних пристроїв. Як влаштоване око? Чому деякі люди погано бачать і як скоригувати їхній зір? Як з особливостями людського зору пов'язане виробництво мультиплікаційних фільмів? Про все це ви дізнаєтесь із цього параграфа.

**1 Згадуємо будову ока**

Око людини — це природна *оптична система*. Око складається з кількох оптичних елементів, які разом призначені для створення зображення.

Око (див. рис. 16.1) має форму кулі діаметром приблизно 2,5 см і ззовні вкрите щільною непрозорою оболонкою — **склерою**. Передня частина склери переходить у прозору *рогову оболонку* — **рогівку**, що діє як збиральна лінза й забезпечує 75 % здатності ока заломлювати світло

Ізсередины склера вкрита *судинною оболонкою*, яка в передній частині ока переходить у *райдужну оболонку* — **райдужку**. У центрі райдужки є круглий отвір — **зіниця**. Зіниця звужується в разі збільшення освітленості й розширюється в разі її ослаблення.

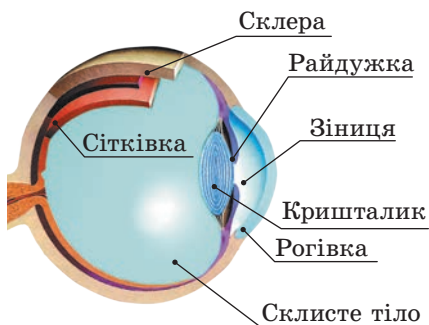


Рис. 16.1. Будова ока

Здатність ока пристосовуватися до різної освітленості називають **адаптацією**.

За зіницею розташований **кришталік** — збиральна лінза, яка завдяки скріпленім із нею м'язам може змінювати свою кривизну, а отже, оптичну силу.

В утворенні зображення бере участь і **склисте тіло** — прозора драглиста маса, що заповнює простір між кришталіком і сітківкою.

Світло, яке потрапляє в око, заломлюється в рогівці, кришталику та склистому тілі. У результаті на сітківці — світлочутливій поверхні очного дна — утворюється *дійсне, зменшене, обернене зображення* предмета (рис. 16.2).

## 2 З'ясуємо, чому людина бачить як віддалені предмети, так і ті, що поряд

Якщо людина має гарний зір, вона бачить чіткими як далеко, так і близько розташовані предмети. Це відбувається тому, що в разі зміни відстані до предмета кришталік змінює кривизну, тобто змінює свою оптичну силу.

Здатність кришталіка змінювати свою кривизну в разі зміни відстані до розглядуваного предмета називають **акомодацією**.

Якщо людина дивиться на віддалені предмети, в її око потрапляють майже паралельні промені. У цьому випадку око найбільш розслаблене. (Згадайте: замислившись, людина дивиться ніби вдалину!) Чим ближче розташований предмет, тим сильніше напружується око (м'язи ока збільшують кривизну кришталіка).

Найменшу відстань, на якій око бачить предмет практично не втомлюючись, називають **відстанню найкращого зору**.

Для людини з нормальним зором відстань найкращого зору дорівнює приблизно 25 см. Саме на цій відстані така людина тримає книжку.

## 3 Знайомимося з інерцією зору

Якщо швидко переміщувати в темряві бенгальський вогонь, то спостерігач побачить світні фігури, утворені «вогняним контуром». Під час швидкого обертання каруселі її різнокольорові лампи, зливаючись, виглядають для спостерігача як кільця. Очі людини весь час кліпають, при цьому ми не помічаємо, що в певний інтервал часу предмет, на який ми дивимося, стає невидимим.

Усі описані явища пояснюються **інерцією зору**. Річ у тім, що після того як зображення предмета зникає із сітківки ока (предмет прибирають, припиняють освітлювати, затуляють непрозорим екраном тощо), зоровий образ, викликаний цим предметом, зберігається протягом 0,1 с.

Інерцію зору використовують в анімаційному кіно. Картинки на екрані дуже швидко (24 рази на секунду) змінюють одна одну; під час їх зміни

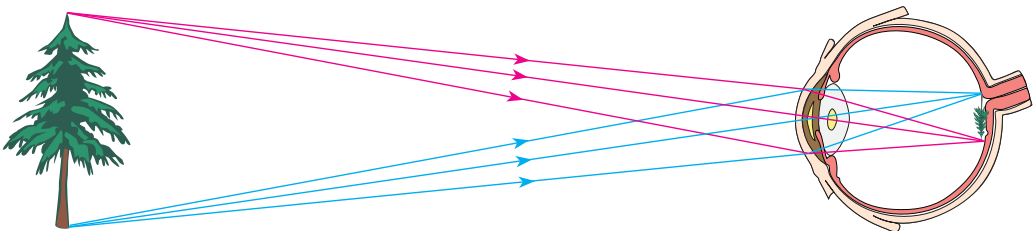


Рис. 16.2. Зображення, яке утворюється на сітківці ока, — дійсне, зменшене, обернене

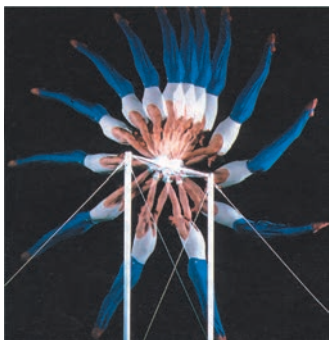


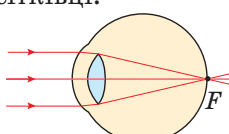
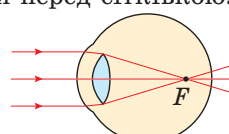
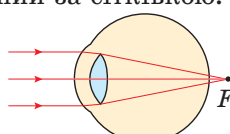
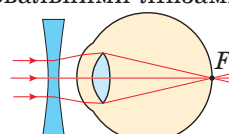
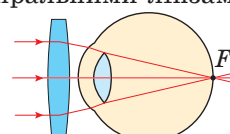
Рис. 16.3. Стробоскопічна фотографія гімнаста

екран не освітлюється, але глядач цього не помічає, а просто бачить низку картинок, що чергуються. Так на екрані створюється ілюзія руху.

- ?** Скільки ж картинок потрібно намалювати художнику, щоб одержати мультиплікаційний фільм тривалістю лише 10 хв?

На інерції зору також базується застосування стробоскопа. (Стробоскоп являє собою джерело світла, що випромінює світлові спалахи через малі рівні інтервали часу.) Під час фотографування об'єктів, що освітлені стробоскопом, отримують стробоскопічні фотографії (рис. 16.3).

#### 4 Дізнаємося про вади зору та їх корекцію

Нормальний зір	Вади зору	
	короткозорість	далекозорість
Фокус $F$ оптичної системи ока у спокійному стані розташований на сітківці.	Фокус $F$ оптичної системи ока у спокійному стані розташований перед сітківкою.	Фокус $F$ оптичної системи ока у ненапруженому стані розташований за сітківкою.
		
На сітківці утворюється чітке зображення віддалених предметів.	На сітківці утворюється розмите зображення віддалених предметів.	На сітківці утворюється розмите зображення віддалених предметів.
Відстань найкращого зору — приблизно 25 см. Саме на цій відстані людина з нормальним зором тримає книжку.	Відстань найкращого зору менша від 25 см. Короткозора людина читає книжку, наближуючи її до очей.	Відстань найкращого зору більша за 25 см. Далекозора людина читає книжку, віддаляючи її від очей.
Фокусна відстань нормального ока становить приблизно 1,71 см.	Короткозорість коригується окулярами із розсіювальними лінзами.	Далекозорість коригується окулярами зі збиральними лінзами.
<b>?</b> Визначте оптичну силу оптичної системи «нормальне око».		



#### Підбиваємо підсумки

Із точки зору фізики око являє собою оптичну систему, основними елементами якої є рогівка, кришталик і склисте тіло. У цій оптичній системі заломлюється світло, і в результаті на сітківці — світлочутливій поверхні очного дна — утворюється зменшене, дійсне, обернене зображення предмета.



Після того як зображення предмета зникає із сітківки ока, зоровий образ, викликаний цим предметом, зберігається у свідомості людини протягом 0,1 с. Цю властивість називають інерцією зору.



### Контрольні запитання

1. Опишіть будову людського ока та призначення його окремих оптичних елементів.
2. Як змінюється діаметр зіниці в разі зменшення освітленості?
3. Чому людина з нормальним зором може однаково чітко бачити як далеко, так і близько розташовані предмети?
4. Який дефект зору називають короткозорістю? Як його можна скоригувати?
5. Який дефект зору називають далекозорістю? Як його можна скоригувати?
6. Яку властивість зору називають інерцією зору? Наведіть приклади застосування цієї властивості.



### Вправа № 16

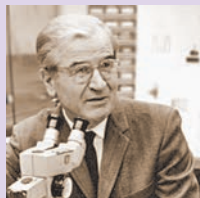
1. Оптична сила лінз бабусиних окулярів  $-2,5$  дптр. Якою є фокусна відстань цих лінз? Який дефект зору має бабуся?
2. На якій мінімальній відстані від ока людина з нормальним зором має розташувати дзеркальце, щоб, не втомлюючись, побачити чітке зображення ока?
3. Чому, щоб краще бачити, короткозора людина мружить очі?
4. Чому навіть у чистій воді людина без маски погано бачить?
5. Хлопчик читає книжку, тримаючи її на відстані 20 см від очей. Визначте оптичну силу лінз, які необхідні хлопчикові, щоб читати книжку на відстані найкращого зору для нормального ока.
6. Проведіть аналогію між фотоапаратом і оком людини. Яку функцію ока виконує та чи інша частина фотоапарата? У разі потреби зверніться до додаткових джерел інформації.
7. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про методи профілактики захворювань зору. Як можна виправити зір?



### Експериментальне завдання

Запропонуйте декілька способів, за допомогою яких можна визначити, який дефект зору (короткозорість чи далекозорість) коригують ті або інші окуляри. Знайдіть кілька різних окулярів (попросіть у рідних, сусідів, друзів) і перевірте, чи «працюють» запропоновані вами способи.

## Фізика і техніка в Україні



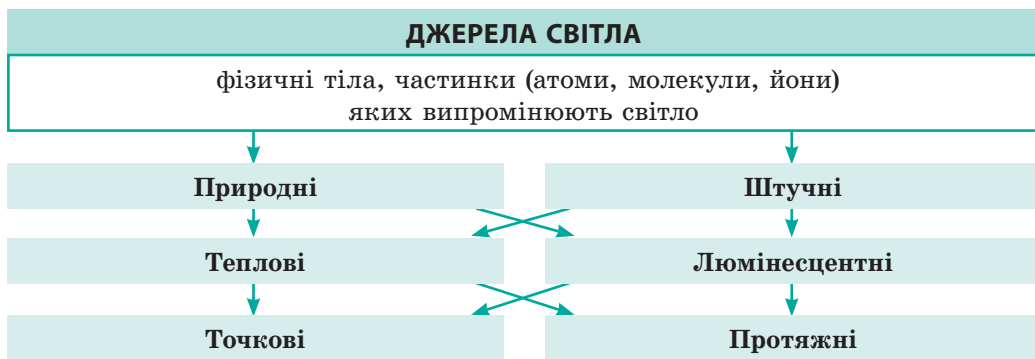
**Олександр Теодорович Смакула** (1900–1983) — видатний український фізик і винахідник. Використавши поняття квантових осциляторів, О. Т. Смакула зміг пояснити радіаційне забарвлення кристалів і вивести кількісне математичне співвідношення, відоме в науці як «формула Смакули». Праці вченого створили передумови для синтезу вітамінів А, В<sub>2</sub> та ін., а процес трансформації кристалічного вуглецю називають тепер «інверсією Смакули».

У 1935 р. О. Т. Смакула зробив і запатентував відкриття, завдяки якому його ім'я назавжди залишиться в історії науки, — спосіб поліпшення оптичних приладів («просвітлення оптики»). Суть відкриття в тому, що поверхню скляної лінзи вкривають спеціальним шаром плівки з певного матеріалу завтовшки  $1/4$  довжини падаючої хвилі, що значно зменшує відбивання світла від поверхні лінзи й водночас збільшує контрастність зображення. Це відкриття стало великим здобутком, адже оптичні лінзи є основним елементом різних приладів (фотоапаратів, біноклів, оптичних пристроїв до зброї тощо).

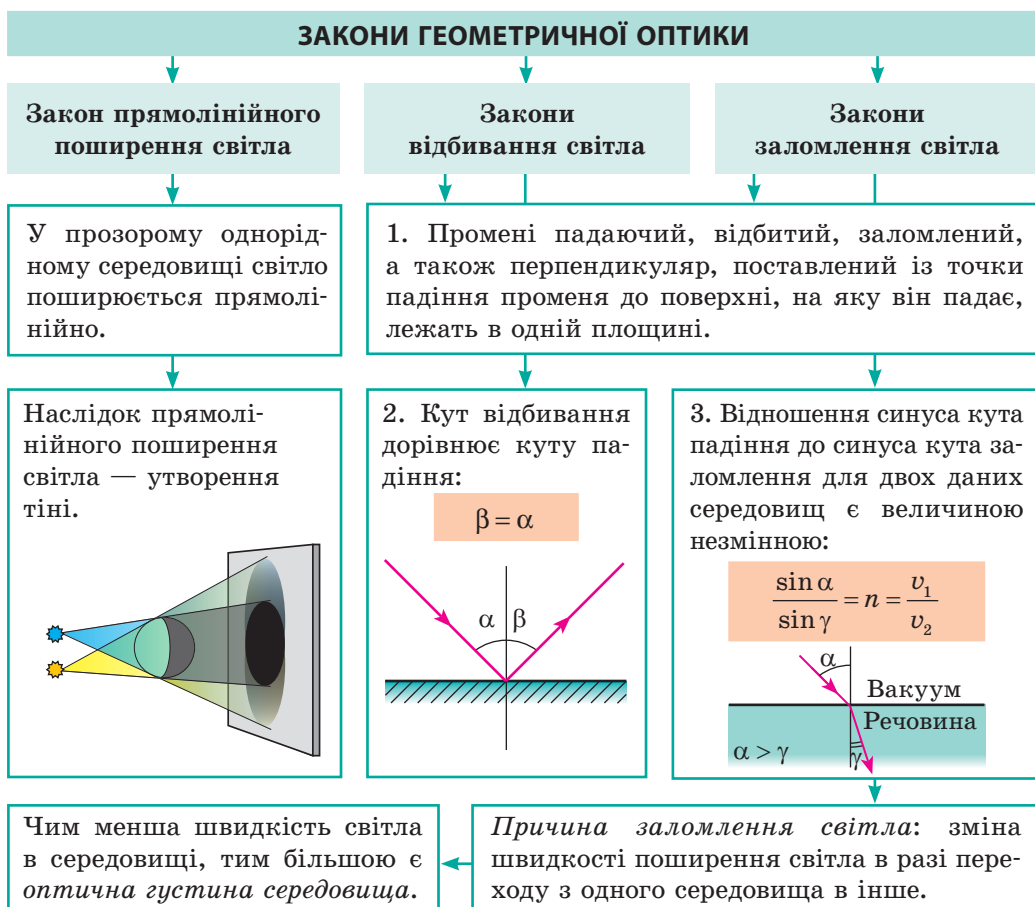
2000 рік був оголошений ЮНЕСКО роком О. Т. Смакули.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ II «Світлові явища»

- Вивчивши розділ II, ви дізналися, що ми бачимо навколишній світ завдяки тому, що *тіла навколо нас відбивають світло* або самі є *джерелами світла*.



- Ви дізналися про *закони поширення світла* — *закони геометричної оптики*.



3. Ви ознайомилися з дослідами І. Ньютона і виявили, що біле світло складається зі світла різних кольорів. Світло різних кольорів у вакуумі поширюється з однаковою швидкістю ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), а в середовищі — з різною.

**ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА**

залежність показника заломлення середовища від кольору світла

**Досліди І. Ньютона**



**Спектральні кольори**


Червоний   Оранжевий   Жовтий  
Зелений   Блакитний   Синій   Фіолетовий

Найбільший показник заломлення має фіолетове світло, найменший — червоне

4. Ви навчилися будувати зображення в плоскому дзеркалі та лінзах.

**ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕННЯ**

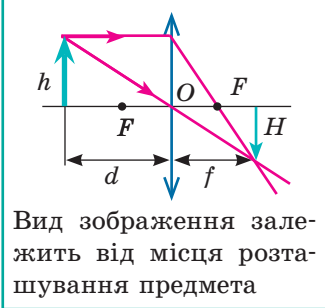
**Плоске дзеркало**



Зображення уявне;  
симетричне предмету  
відносно поверхні  
дзеркала

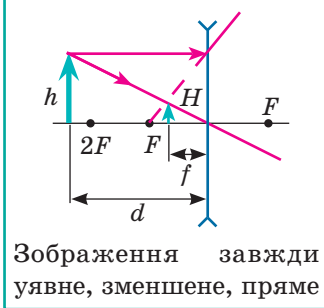
**Лінза**

збиральна



Вид зображення залежить від місця розташування предмета

розсіювальна



Зображення завжди уявне, зменшене, пряме

Оптична сила лінзи:  $D = \frac{1}{F}$  .      Формула тонкої лінзи:  $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$  .

Збільшення предмета в лінзі:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$  .

5. Ви ознайомилися з оптичними пристроями, в яких застосовують лінзи.

**ОПТИЧНІ ПРИСТРОЇ**

Пристрої, які озброюють око

Лупа

Окуляри

Пристрої, які дають зображення на екрані

Фотоапарат

Проекційний апарат

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ II «Світлові явища»

Завдання 1–8 містять тільки одну правильну відповідь.

1. (1 бал) Яке оптичне явище ілюструє фотографія (рис. 1)?

- а) відбивання світла;  
б) поглинання світла;  
в) дисперсію світла;  
г) заломлення світла.



Рис. 1

2. (1 бал) Який закон підтверджується існуванням сонячних і місячних затемнень?  
а) закон відбивання світла;  
б) закон прямолінійного поширення світла;  
в) закон збереження енергії;  
г) закон заломлення світла.

3. (1 бал) Яким є зображення предмета у плоскому дзеркалі?

- а) збільшеним дійсним;                      в) зменшеним уявним;  
б) рівним дійсним;                          г) рівним уявним.

4. (1 бал) Промінь світла падає з повітря на поверхню скляної пластини (рис. 2). На якому з наведених рисунків правильно зазначено всі три кути: кут падіння  $\alpha$ , кут відбивання  $\beta$  і кут заломлення  $\gamma$ ?

- а) 1;  
б) 2;  
в) 3;  
г) 4.

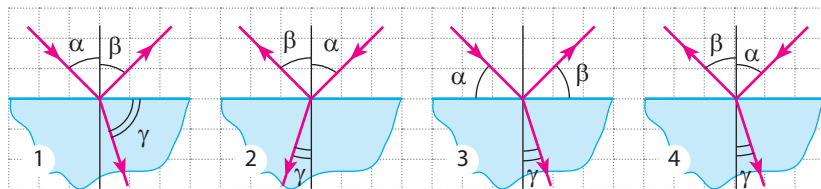


Рис. 2

5. (2 бали) Яка точка (рис. 3) є зображенням світлової точки  $S$  у плоскому дзеркалі?

- а) 1;                      б) 2;                      в) 3;  
г) зображення в дзеркалі немає.

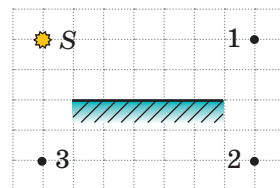


Рис. 3

6. (2 бали) Чому дорівнює оптична сила лінзи, хід променів у якій показано на рис. 4?

- а)  $-0,04$  дптр;            в)  $+25$  дптр;  
б)  $+4$  дптр;            г)  $+50$  дптр.

7. (2 бали) Яку ваду зору має людина, якщо вона носить окуляри, нижня частина яких — опуклі стекла, а верхня частина — плоскі?

- а) далекозорість;  
б) короткозорість;  
в) людина не має вад зору;  
г) визначити неможливо.

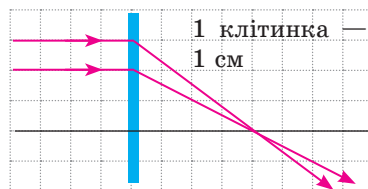


Рис. 4

8. (2 бали) Під час фотографування на об'єктив фотоапарата сіла муха. Чи вплине це на знімок, і якщо вплине, то як?
- жодним чином не вплине;
  - на знімку з'явиться зображення мухи;
  - знімок буде менш яскравим;
  - знімок буде більш яскравим.
9. (3 бали) Людина наближається до дзеркала зі швидкістю 2 м/с. Із якою швидкістю до людини наближається її зображення в дзеркалі?
10. (3 бали) Кут падіння променя на дзеркальну поверхню дорівнює  $70^\circ$ . Чому дорівнює кут між відбитим променем і дзеркальною поверхнею?
11. (3 бали) Світло падає з повітря на поверхню прозорої речовини під кутом  $45^\circ$ . Визначте абсолютний показник заломлення цієї речовини, якщо заломлене світло поширюється під кутом  $60^\circ$  до межі поділу середовищ.
12. (3 бали) Предмет розташований на відстані 1 м від збиральної лінзи з фокусною відстанню 0,5 м. На якій відстані від лінзи розташоване зображення предмета?
13. (3 бали) Установіть відповідність між середовищем і швидкістю поширення світла в цьому середовищі.
- |          |                         |
|----------|-------------------------|
| 1 Алмаз  | А $1,24 \cdot 10^8$ м/с |
| 2 Бензин | Б $1,76 \cdot 10^8$ м/с |
| 3 Лід    | В $2,00 \cdot 10^8$ м/с |
|          | Г $2,29 \cdot 10^8$ м/с |
14. (4 бали) На рис. 5 подано головну оптичну вісь  $KM$  лінзи, предмет  $AB$  і його зображення  $A_1B_1$ . Визначте тип лінзи, її фокусну відстань і оптичну силу.
15. (4 бали) Чому кривизна кришталика ока риби (рис. 6) більша, ніж у людини?
16. (4 бали) Розглядаючи марку за допомогою лупи, хлопчик бачить її на відстані найкращого зору збільшеною в 4 рази. На якій відстані від ока хлопчик тримає лупу, якщо він має нормальний зір, а оптична сила лупи становить  $+15$  дптр?

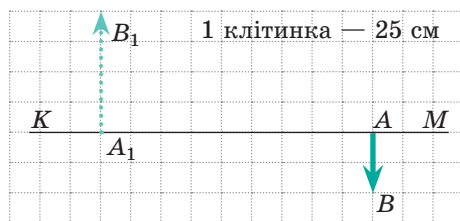


Рис. 5



Рис. 6

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## Нові приймачі та джерела світла

За останні кілька років завдяки прогресу в електроніці унікальні наукові винаходи стали загальнодоступними. Прогрес в електроніці докорінно змінив як джерела, так і приймачі світла.

Розпитайте ваших дідусів і бабусь про те, як виготовляли фотокартки двадцять і більше років тому. Виявиться, що це була досить складна процедура. Для вас же стало звичним, побачивши цікавий сюжет, навести на нього камеру мобільного телефону, натиснути відповідну кнопку й миттєво переслати готове зображення друзям.

Наведемо ще один приклад. Про вузький спрямований пучок світла, що має унікальні властивості, раніше йшлося тільки у фантастичних творах. У наш час лазерний промінь застосовується настільки широко, що навіть найсміливіші фантасти минулого століття не могли б собі цього уявити. То що ж, виходить, розділ фізики під назвою «Оптика» безнадійно застарів і ви марно вивчали розділ II підручника?

Давайте не робити висновків поспіхом і розглянемо деякі із сучасних оптичних пристроїв докладніше.

### Лазер

Усі ви, звичайно, бачили лазерні шоу в цирку або на естрадних концертах. Тонкі світлові пучки пронизують простір зали, швидко пролітають над головами глядачів. Захопливе видовище!

На рисунку показано один із видів лазерів — газовий. Яскравий світний «шнур» у скляній трубці — це не лазерний промінь, а електричний розряд, подібний до розряду в лампах денного світла.

Розряд слугує для «накачування» робочого тіла (газу всередині скляної трубки). Процес «накачування» полягає в тому, що атоми газу поступово набувають надлишкової енергії від електричного розряду, а потім лавиноподібно віддають її у вигляді імпульсу (спалаху) світла.

За назвою речовини робочого тіла почали класифікувати й самі лазери: газові, рідинні та найзручніші в побуті — твердотільні лазери.

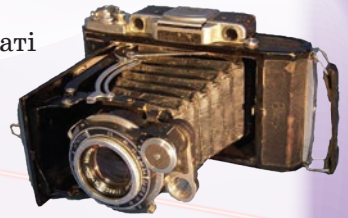
Естрадні шоу — далеко не єдине застосування лазерів. Ці пристрої широко використовують у медицині, військовій справі тощо.



Газовий лазер (LASER — перші літери англ. *light amplification by stimulated emission of radiation* — підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання)

## Цифровий фотоапарат

Пристроєм, який фіксує зображення, у фотоапараті старих конструкцій була фотоплівка. А в цифрових фотоапаратах таким пристроєм є пластинка, вкрита дуже дрібними світловими датчиками (пікселями). Кожний із цих датчиків фіксує «шматочок» світлового потоку. Що меншим є розмір пікселя, то якісніше зображення можна отримати. Пластинка гарного фотоапарата нараховує 18–20 мільйонів пікселів. Кількість пікселів у мобільному телефоні менша, оскільки зйомка — не основна функція телефону. Відповідно і якість знімків гірша.



Мікропроцесор фотоапарата обробляє інформацію від сенсорів і запам'ятовує її у вигляді окремого файла.

Історія фотографії налічує понад 180 років. Але й у старому фотоапараті, і в найсучаснішому одним із найважливіших елементів є оптична система, яка має забезпечити різке зображення різних об'єктів зйомки: і вашого приятеля, що стоїть поруч, і далеких гір, що видніють на обрії. Схоже, зарано списувати оптику в архів, конструкторам сучасних фотоапаратів і відеокамер вона ще стане в пригоді!

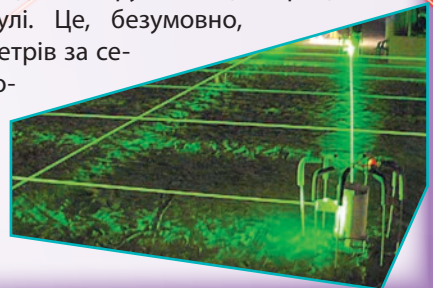
## Це цікаво

Дуже часто творці сучасних фільмів свідомо (або через брак знань) перекручують інформацію про можливості лазерів. Наведемо лише кілька прикладів.

*Хоч скільки димитимеш, все одно не побачиш.* У багатьох фільмах, щоб виявити охоронну сигналізацію, герої пускають клуби диму — і промені лазера стають видимими. Насправді виготовити лазери, які працюють в інфрачервоному (невидимому для ока) діапазоні, набагато простіше, ніж ті, що працюють у видимому діапазоні. Саме їх і використовують у стандартних охоронних системах. Інфрачервоний промінь, скільки його не задимлюй, усе одно залишається непомітним для ока.

*Бережіть очі.* Лазери у фільмах застосовують для розрізання металевих перешкод (ґрат, дверей сейфа тощо) — і це відповідає дійсності. Ось тільки автори фільмів часто забувають про захист героїв від відбитих променів. Відбиття надпотужного променя від розрізаного металу буде також досить потужним. Тож, як мінімум, бережіть очі!

*Спробуй наздожени.* Іноді творці фільмів демонструють, що процес поширення променя подібний до польоту кулі. Це, безумовно, не так. Швидкість руху кулі становить кількасот метрів за секунду. Тому її політ може бути справді зареєстрований за допомогою швидкісної кінозйомки. А ось аналогічним чином простежити за процесом поширення світлового променя (нагадаємо, що швидкість світла величезна — 300 000 км/с) неможливо.



## Орієнтовні теми проектів

1. Складання найпростішого оптичного приладу.
2. Оптичні ілюзії.
3. Дослідження потужності та ККД штучних джерел світла різних типів.
4. Увігнуті дзеркала: властивості та приклади застосування.
5. Оптичні явища в природі.
6. Око і зір.

## Теми рефератів і повідомлень

1. Майбутнє — за світлодіодами.
2. Диво фотосинтезу.
3. Міражі: як вони утворюються і де їх можна спостерігати.
4. Навіщо пішоходу на одязі світловідбиваючі поверхні.  
Як такі поверхні використовують автомобілісти.
5. Колір і світло.
6. Чому вночі ми майже не розрізняємо кольори.
7. Оптичне мистецтво «Оп-арт» як синтез науки і мистецтва.
8. Дефекти зору та методи їх коригування за допомогою оптичних пристроїв.
9. Зорові тренажери. Чому і як можна відновити зір.
10. Оптичні прилади в медицині.
11. Історія фотографії.
12. Ультрафіолетове очищення води.
13. Чому мильні бульбашки є різнокольоровими.
14. Прилади нічного бачення.
15. Підзорна труба: історія створення, будова, принцип дії.

## Теми експериментальних досліджень

1. Вивчення законів поширення світла за допомогою лазерної указки.
2. Вивчення законів заломлення світла та пов'язаних із ними оптичних ефектів. Оптичні фокуси.
3. Дослідження спектрального складу світла за допомогою призми (відтворення дослідів І. Ньютона).
4. Дослідження заломлюючих властивостей збиральної та розсіювальної лінз.
5. Виготовлення оптичних пристроїв (камера-обскура, калейдоскоп).



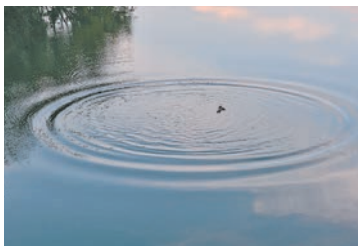
# РОЗДІЛ III

## МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

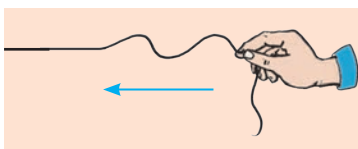
- Ви знаєте, що більшу частину інформації про навколишній світ людина отримує через зір і слух, а тепер дізнаєтеся, що спільного в передачі інформації за допомогою світла і звуку
- Кожен із вас уміє користуватися мобільним телефоном, а тепер ви дізнаєтеся, як працює стільниковий зв'язок
- Ви чули про загибель «Титаніка», а тепер дізнаєтеся, чому сучасні океанські лайнери навряд чи спіткає його доля
- Ви неодноразово чули відлуння, а тепер дізнаєтеся, як воно допомагає виміряти глибину океану
- Ви добре знаєте, що таке рентген, а тепер дізнаєтеся, що спільного між рентгенівськими і світловими променями



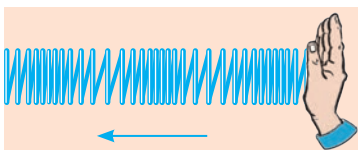
## § 17. ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХВИЛЬ. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ, ЯКІ ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ХВИЛІ



**Рис. 17.1.** Від камінця, кинутого у воду, поверхню води поширюються хвилі



**Рис. 17.2.** Поширення хвилі мотузкою. Стрілкою показано напрямок поширення хвилі



**Рис. 17.3.** Поширення хвилі пружиною. Стрілкою показано напрямок поширення хвилі

У курсі фізики 7 класу ви вивчали механічні коливання. Часто буває так, що, виникнувши в одному місці, коливання поширюються в сусідні ділянки простору. Згадайте, наприклад, поширення коливань від кинутого у воду камінця або коливання земної кори, які поширюються від епіцентру землетрусу. У таких випадках говорять про хвильовий рух — хвилі (рис. 17.1). Із цього параграфу ви дізнаєтесь про особливості хвильового руху.

### 1 Створюємо механічні хвилі

Візьмемо досить довгу мотузку, один кінець якої прикріпимо до вертикальної поверхні, а інший будемо рухати вниз-вгору (коливати). Коливання від руки будуть поширюватися мотузкою, поступово залучаючи до коливального руху все більш віддалені точки, — мотузкою побіжить *механічна хвиля* (рис. 17.2).

**Механічною хвилею** називають поширення коливань у пружному середовищі\*.

Розглянемо ще один приклад. Закріпимо горизонтально довгу м'яку пружину та здійснимо по її вільному кінцю серію послідовних ударів — пружиною побіжить хвиля, яка складатиметься зі згущень і розріджень витків пружини (рис. 17.3).

Описані вище хвилі можна побачити, проте більшість механічних хвиль є невидимими, наприклад звукові хвилі (рис. 17.4).

На перший погляд, усі механічні хвилі є зовсім різними, але причини їх виникнення та поширення — однакові. Давайте розбиратися.

### 2 З'ясовуємо, як і чому в середовищі поширюється механічна хвиля

Будь-яка механічна хвиля створюється тілом, яке коливається, — *джерелом хвилі*. Здійснюючи коливальний рух, джерело хвилі *деформує* прилеглі до нього шари середовища (стискає та

\* Середовище називають *пружним*, якщо під час його деформації виникають сили, які протидіють цій деформації, — *сили пружності*.

розтягує їх або зсуює). У результаті виникають *сили пружності*, які діють на сусідні шари середовища та спонукають їх здійснювати *вимушені коливання*. Ці шари, у свою чергу, деформують наступні шари та змушують їх коливатися. Поступово, один за одним, усі шари середовища долучаються до коливального руху — середовищем поширюється механічна хвиля.

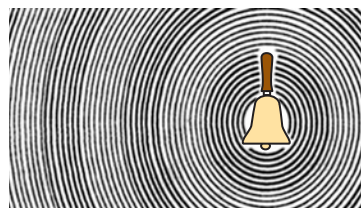
### 3 Розрізняємо поперечні та поздовжні механічні хвилі

Якщо порівняти поширення хвилі мотузкою (див. [рис. 17.2](#)) і пружиною (див. [рис. 17.3](#)), можна побачити певну різницю.

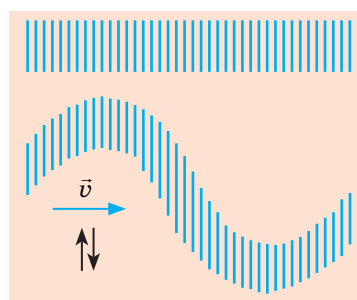
Окремі частини мотузки *рухаються (коливаються) перпендикулярно до напрямку поширення хвилі* (на [рис. 17.2](#) хвиля поширюється справа наліво, а частини мотузки рухаються вниз-вгору). Такі хвилі називають **поперечними** ([рис. 17.5](#)). У ході поширення поперечних хвиль відбувається *зсув* одних шарів середовища відносно інших. Деформація зсуву супроводжується виникненням сил пружності лише в твердих тілах, тому поперечні хвилі не можуть поширюватися в рідинах і газах. Отже, *поперечні хвилі поширюються тільки в твердих тілах*.

Під час поширення хвилі пружиною окремі витки пружини *рухаються (коливаються) вздовж напрямку поширення хвилі*. Такі хвилі називають **поздовжніми** ([рис. 17.6](#)). У ході поширення поздовжніх хвиль у середовищі відбуваються деформації стиснення та розтягнення (вздовж напрямку поширення хвилі густина середовища почергово то збільшується, то зменшується). Такі деформації в будь-якому середовищі супроводжуються виникненням сил пружності. Тому *поздовжні хвилі поширюються і в твердих тілах, і в рідинах, і в газах*.

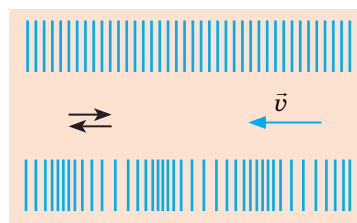
Хвилі на поверхні рідини не є ані поздовжніми, ані поперечними. Вони мають *складний поздовжньо-поперечний характер*, при цьому частинки рідини рухаються по еліпсах. У цьому легко переконатися, якщо кинути в море легку тріску та поспостерігати її рух на поверхні води.



**Рис. 17.4.** Коливання тіла, яке звучить, є причиною почергових згущень та розріджень середовища, — середовищем поширюється звукова хвиля



**Рис. 17.5.** У поперечній хвилі шари середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі



**Рис. 17.6.** У поздовжній хвилі шари середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі

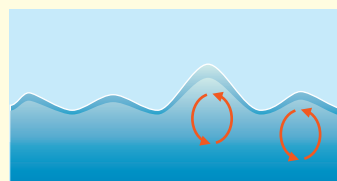




Рис. 17.7. До запитання в § 17

#### 4 Виявляємо основні властивості хвиль

1. Коливальний рух від однієї точки середовища до іншої передається не миттєво, а з певним запізненням, тому *хвилі поширюються в середовищі зі скінченною швидкістю*.

2. Джерелом механічних хвиль завжди є тіло, що коливається; оскільки коливання частин середовища в ході поширення хвилі є вимушеними, то *частота коливань кожної частини середовища дорівнює частоті коливань джерела хвилі*.

3. *Механічні хвилі не можуть поширюватись у вакуумі*.

4. *Хвильовий рух не супроводжується перенесенням речовини* — частини середовища лише коливаються біля деяких положень рівноваги.

5. Із приходом хвилі частини середовища починають рухатися (набувають кінетичної енергії). Це означає, що *під час поширення хвилі відбувається перенесення енергії*.

**Перенесення енергії без перенесення речовини є найважливішою властивістю будь-якої хвилі.**

**?** Згадайте поширення хвиль на поверхні води (рис. 17.7). Які спостереження підтверджують основні властивості хвильового руху?

#### 5 Згадуємо фізичні величини, які характеризують коливання

Хвиля — це поширення *коливань*. Тому фізичні величини, які характеризують коливання (*частота, період, амплітуда*), також характеризують і хвилю. Отже, згадаємо 7 клас:

	Фізичні величини, які характеризують коливання		
	Частота коливань $\nu$	Період коливань $T$	Амплітуда коливань $A$
Означення	кількість коливань за одиницю часу	час одного коливання	максимальна відстань, на яку відхиляється точка від положення рівноваги
Формула для визначення	$\nu = \frac{N}{t}$ $N$ — кількість коливань за час $t$	$T = \frac{t}{N}$	—
Одиниця в СІ	герц (1 Гц = 1 с <sup>-1</sup> )	секунда (с)	метр (м)

*Зверніть увагу!* Під час поширення механічної хвилі всі частини середовища, в якому поширюється хвиля, коливаються з однаковою частотою ( $\nu$ ), що дорівнює частоті коливань джерела хвилі, тому період коливань ( $T$ ) для всіх точок середовища теж є однаковим, адже  $T = \frac{1}{\nu}$ . А от амплітуда коливань поступово зменшується з віддаленням від джерела хвилі.

## 6 Визначаємо довжину та швидкість поширення хвилі

Згадайте поширення хвилі мотузкою. Нехай кінець мотузки здійснив одне повне коливання, тобто час поширення хвилі дорівнює одному періоду ( $t = T$ ). За цей час хвиля пошириться на певну відстань  $\lambda$  (рис. 17.8, а). Цю відстань називають *довжиною хвилі*.

**Довжина хвилі**  $\lambda$  — відстань, на яку поширюється хвиля за час, що дорівнює періоду  $T$ :

$$\lambda = \nu T,$$

де  $\nu$  — швидкість поширення хвилі.

Одиниця довжини хвилі в СІ — метр:

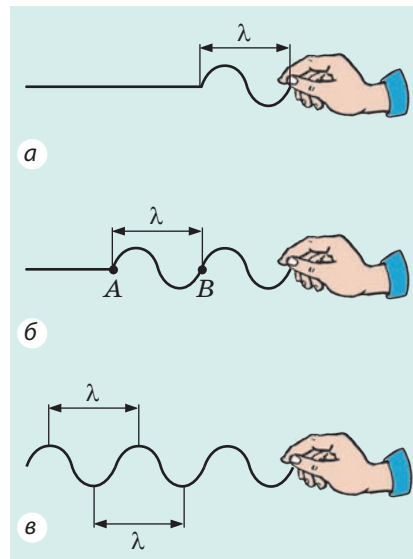
$$[\lambda] = 1 \text{ м.}$$

Неважко помітити, що точки мотузки, які розташовані одна від одної на відстані однієї довжини хвилі, коливаються синхронно — мають однакову *фазу коливань* (рис. 17.8, б, в). Наприклад, точки А і В мотузки одночасно рухаються вгору, одночасно досягають гребеня хвилі, потім одночасно починають рухатися вниз і т. д.

Скориставшись формулою  $\lambda = \nu T$ , можна визначити швидкість поширення хвилі:  $\nu = \frac{\lambda}{T}$ . Ураховуючи, що  $\frac{1}{T} = \nu$ , отримуємо *формулу взаємозв'язку довжини, частоти та швидкості поширення хвилі* — **формулу хвилі**:

$$\nu = \lambda \nu$$

Якщо хвиля переходить з одного середовища в інше, швидкість її поширення змінюється; частота хвилі визначається джерелом хвилі, тому залишається незмінною. Таким чином, відповідно до формули  $\nu = \lambda \nu$  у разі переходу хвилі з одного середовища в інше *довжина хвилі змінюється*.



**Рис. 17.8.** Довжина хвилі дорівнює відстані, на яку поширюється хвиля за час одного коливання (це також відстань між двома найближчими гребенями або між двома найближчими западинами)

### Формула хвилі

$$\nu = \lambda \nu$$

$\nu$  — швидкість поширення хвилі;

$\lambda$  — довжина хвилі;

$\nu$  — частота хвилі

## 7 Учимся розв'язувати задачі

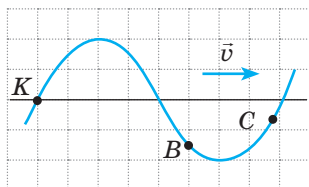


Рис. 1

**Задача.** Шнуром поширюється поперечна хвиля зі швидкістю 3 м/с. На рис. 1 показано положення шнура в певний момент часу та напрямок поширення хвилі. Скориставшись рисунком і вважаючи, що сторона клітинки дорівнює 15 см, визначте: 1) амплітуду, період, частоту і довжину хвилі; 2) напрямок, у якому в даний момент часу рухаються точки  $K$ ,  $B$  і  $C$  шнура.

### Розв'язання

Хвиля є поперечною, тому точки шнура здійснюють коливання перпендикулярно до напрямку поширення хвилі (рухаються вниз-вгору біля певних положень рівноваги).

1) Із рис. 1 бачимо, що максимальне відхилення від положення рівноваги (амплітуда  $A$  хвилі) дорівнює 2 клітинкам. Отже,  $A = 2 \cdot 15 \text{ см} = 30 \text{ см}$ .

Відстань між гребенем і западиною — 60 см (4 клітинки), відповідно відстань між двома найближчими гребенями (довжина хвилі) вдвічі більша. Отже,  $\lambda = 2 \cdot 60 \text{ см} = 120 \text{ см} = 1,2 \text{ м}$ .

Частоту  $\nu$  і період  $T$  хвилі знайдемо, скориставшись формулою хвилі:

$$v = \lambda \nu \Rightarrow \nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \text{ м/с}}{1,2 \text{ м}} = 2,5 \frac{1}{\text{с}} = 2,5 \text{ Гц};$$

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ (с)}.$$

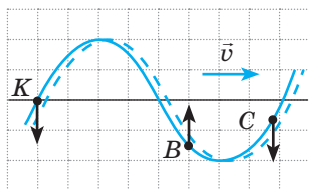


Рис. 2

2) Для визначення напрямку руху точок шнура виконаємо додаткову побудову. Нехай за невеликий інтервал часу  $\Delta t$  хвиля змістилася на деяку невелику відстань. Оскільки хвиля зміщується вправо, а її форма з часом не змінюється, точки шнура займуть положення, які показано на рис. 2 пунктиром.

Хвиля є поперечною, тобто точки шнура рухаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Із рис. 2 бачимо, що точка  $K$  через інтервал часу  $\Delta t$  опиниться нижче від свого початкового положення, отже, швидкість її руху напрямлена вниз; точка  $B$  переміститься вище, отже, швидкість її руху напрямлена вгору; точка  $C$  переміститься нижче, отже, швидкість її руху напрямлена вниз.

**Відповідь:**  $A = 30 \text{ см}$ ;  $T = 0,4 \text{ с}$ ;  $\nu = 2,5 \text{ Гц}$ ;  $\lambda = 1,2 \text{ м}$ ; точки  $K$  і  $C$  рухаються вниз, точка  $B$  — вгору.



### Підбиваємо підсумки

Поширення коливань у пружному середовищі називають механічною хвилею. Механічну хвилю, в якій частини середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, називають поперечною; хвилю, в якій частини середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, називають поздовжньою.

Хвиля поширюється в просторі не миттєво, а з певною швидкістю. Під час поширення хвилі відбувається перенесення енергії без перенесення речовини. Відстань, на яку поширюється хвиля за час, що дорівнює періоду, називають довжиною хвилі — це відстань між двома найближчими точками, які коливаються синхронно (мають однакову фазу коливань). Довжина  $\lambda$ , частота  $\nu$  і швидкість  $v$  поширення хвилі пов'язані формулою хвилі:  $v = \lambda\nu$ .

### Контрольні запитання



1. Дайте означення механічної хвилі.
2. Опишіть механізм утворення та поширення механічної хвилі.
3. Назвіть основні властивості хвильового руху.
4. Які хвилі називають поздовжніми? поперечними? У яких середовищах вони поширюються?
5. Що таке довжина хвилі? Від чого вона залежить?
6. Як пов'язані довжина, частота і швидкість поширення хвилі?



### Вправа № 17

1. На рис. 1 показано поширення хвилі мотузкою (а) і пружиною (б). Визначте довжину кожної хвилі.
2. В океані довжина хвилі сягає 270 м, а її період дорівнює 13,5 с. Визначте швидкість поширення такої хвилі.
3. Чи збігаються швидкість поширення хвилі та швидкість руху точок середовища, яким поширюється хвиля?
4. Чому механічна хвиля не поширюється у вакуумі?
5. У результаті вибуху, зробленого геологами, в земній корі поширилася хвиля зі швидкістю 4,5 км/с. Відбита від глибоких шарів Землі, ця хвиля була зафіксована на поверхні Землі через 20 с після вибуху. На якій глибині залягає порода, густина якої різко відрізняється від густини земної кори?
6. На рис. 2 зображено дві мотузки, якими поширюється поперечна хвиля. На кожній мотузці показано напрямок коливань однієї із її точок. Для кожного випадку а і б визначте напрямок поширення хвилі.
7. На рис. 3 зображено положення двох шнурів, якими поширюється хвиля, показано напрямок поширення кожної хвилі. Сторона клітинки дорівнює 20 см. Для кожного випадку а і б визначте:
  - 1) амплітуду, період, довжину хвилі;
  - 2) напрямок, у якому в даний момент часу рухаються точки А, В і С шнура;
  - 3) кількість коливань, що робить будь-яка точка шнура за 30 с.
8. Людина, стоячи на березі моря, визначила, що відстань між сусідніми гребенями хвиль, які йдуть одна за одною, дорівнює 15 м. Крім того, вона підраховувала, що за 75 с до берега доходить 16 хвильових гребенів. Визначте швидкість поширення хвиль.

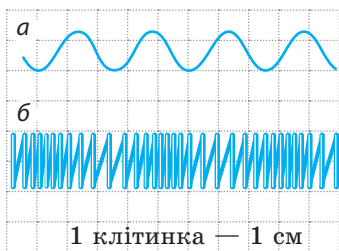


Рис. 1

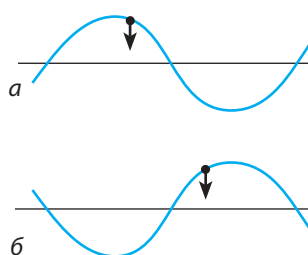


Рис. 2

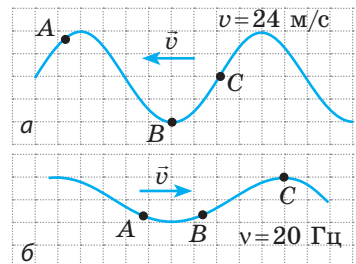


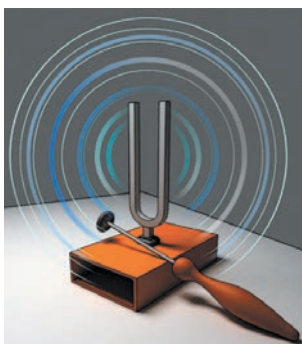
Рис. 3

## § 18. ЗВУКОВІ ХВИЛІ. ІНФРАЗВУК І УЛЬТРАЗВУК

Ми живемо в океані звуків. Що являють собою звуки? Як вони утворюються? Чому неможливо почути гуркіт ракетних двигунів у космосі? Чому грім чути пізніше за спалах блискавки? Для чого в студіях звукозапису стіни вкривають шаром звукопоглинальних матеріалів? Як у повній темряві кажани та дельфіни знаходять здобич? Спробуємо знайти відповіді на ці запитання.



**Рис. 18.1.** Після того як кінець лінійки буде відпущено, лінійка почне коливатися та випромінювати звук



**Рис. 18.2.** Ніжки камертона коливаються й тому випромінюють звук

### 1 Знайомимось із джерелами та приймачами звуку

Притисніть до краю стола один кінець лінійки і смикніть її за вільний кінець — він почне коливатися, а ви почуєте звук (рис. 18.1). Річ у тім, що коливання лінійки викликає згущення і розрідження повітря і як наслідок — періодичні збільшення та зменшення тиску в зоні коливань. Стиснуте повітря, намагаючись розширитися, тисне на сусідні шари, теж стискаючи їх. Так від лінійки в усі боки починає поширюватися поздовжня механічна хвиля, яка врешті-решт досягає вашого вуха. Тиск повітря біля вушної мембрани періодично змінюється, і мембрана починає коливатися. Кінець лінійки коливається з частотою понад 20 Гц, саме з такою частотою починає коливатися й вушна мембрана, а коливання з частотою від 20 до 20 000 Гц людина сприймає як звук.

**Звук** — це фізичне явище, що являє собою механічну хвилю частотою від 20 до 20 000 Гц.

**Джерела звуку** — це різноманітні тіла, що коливаються із частотою 20–20 000 Гц. Так, джерелами звуку є мембрани навушників і струни музичних інструментів, дифузори гучномовців і крила комах, частини машин тощо. У трубі, флейті, свистку звук утворюється коливанням стовпа повітря всередині інструментів. Голосові апарати людини й тварин також є джерелами звуку.

**?** Наведіть ще кілька прикладів джерел звуку.

Для вивчення звуку зручно використовувати *камертон* (рис. 18.2). Цей пристрій являє собою металеву «рогатку», закріплену на скриньці, в якій відсутня одна стінка. Якщо гумовим молоточком ударити по ніжках камертона, то камертон випромінюватиме ясний довгий звук, який поступово слабшає, але не змінює своєї частоти.



У приймачах звуку відбувається перетворення звукових сигналів на інші сигнали, завдяки чому звук можна сприймати та аналізувати. До приймачів звуку, зокрема, належать органи слуху людини та тварин, — в цих органах звукові (механічні) коливання перетворюються на нервові імпульси. У техніці для приймання звуку здебільшого застосовують перетворювачі, в яких звукові коливання зазвичай перетворюються на електричні (рис. 18.3).



**Рис. 18.3.** У мікрофоні звукові коливання перетворюються на електричні

## 2 Вимірюємо швидкість поширення звуку

Якщо ми здалека бачимо момент зародження звуку (удар дзвона, сплеск долонь тощо), то помічаємо, що власне звук ми чуємо через певний інтервал часу. Знаючи відстань до джерела звуку та час запізнення, можна виміряти швидкість поширення звуку в повітрі.

Уперше швидкість поширення звуку в повітрі виміряв французький учений *Марін Мерсенн* (1588–1648) у 1636 р.

За температури 20° С швидкість звуку в повітрі становить приблизно 340 м/с. Це майже в мільйон разів менше від швидкості поширення світла. Саме тому грім чути пізніше, ніж видно спалах блискавки (рис. 18.4).

Швидкість поширення звуку залежить від температури, густини, складу та інших характеристик середовища. Так, у рідинах звук поширюється швидше, ніж у газах, і повільніше, ніж у твердих тілах. Швидкість поширення звуку зазвичай збільшується зі збільшенням температури середовища. До того ж чим менша маса молекул середовища, тим швидше поширюється звук. Розв'язуючи задачу, використовуватимемо приблизні значення швидкості поширення звуку (див. таблицю на с. 120).



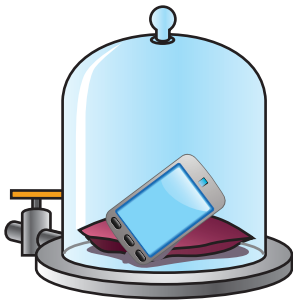
**Рис. 18.4.** Якщо гроза від нас далеко, то гуркіт грому можна почути навіть через 10–20 с після спалаху блискавки

Перші точні вимірювання швидкості поширення звуку у воді здійснили вчені зі Швейцарії *Жан Колладон* і *Шарль Штурм* у 1826 р.

Один із дослідників сидів у човні на Женевському озері та вдаряв по зануреному у воду дзвону. Одночасно з ударом відбувався спалах пороху. Другий дослідник, перебуваючи на відстані 16 км, вимірював час між спалахом пороху та звуком від удару дзвона, який він чув через занурену у воду озера трубу.

*Приблизні значення швидкості поширення звуку в деяких середовищах*

Середовище	$v$ , м/с
Вода	1500
Водень	1250
Залізо, сталь, чавун	5000
Повітря	340
Скло	4500



**Рис. 18.5.** Якщо покласти мобільний телефон під купол повітряного насоса і відкачати повітря, то сигналу виклику ми не почуємо

Крім гучності та висоти тону ми розрізняємо звуки за **тембром**: ту саму ноту, взяту на роялі, саксофоні або різними людьми, ми сприймаємо по-різному. Такі різноманітні «відтінки» звуків і називають тембрами.

Річ у тім, що звуки є складними: крім основної частоти (за якою ми й оцінюємо висоту звуку) будь-який звук містить кілька більш слабких і більш високих додаткових частот — **обертонів**. Чим більше обертонів містить основний звук, тим він багатший.

**?** Проаналізуйте таблицю. Чому, на вашу думку, швидкість поширення звуку у водні більша, ніж у повітрі, а в сталі більша, ніж у воді?

*Зверніть увагу!* Оскільки звук — це механічна хвиля, а для поширення механічної хвилі необхідне середовище, *звукова хвиля не поширюється у вакуумі (рис. 18.5).*

### 3 Вивчаємо характеристики звуку

Звуки різної частоти ми сприймаємо як звуки різного тону: *чим більшою є частота звуку, тим вищий тон звуку*, і навпаки. Ми легко відрізняємо високий тон дзижчання комара від низького тону гудіння джмеля, звучання скрипки — від звучання контрабаса.

**Гучність звуку** визначається насамперед *амплітудою* звукової хвилі (найбільшою зміною тиску в області спостереження): чим більша амплітуда, тим гучніший звук. Проте гучність звуку також залежить від його тону (частоти звукової хвилі). Людське вухо досить погано сприймає звуки низьких (близько 20 Гц) і високих (близько 20 000 Гц) частот, найкраще — середніх частот (1000–3000 Гц).

У ході поширення звуку відбувається поступове *розсіювання та згасання звуку*, тобто зменшення його гучності. Знання закономірностей розсіювання звуку є важливим для визначення дальності поширення звукового сигналу. Так, на дальність поширення звуку в повітрі впливають температура й атмосферний тиск, сила й швидкість вітру тощо. Інколи в глибинах океану утворюються умови для наддалекого (понад 5000 км) поширення звуку — в такому випадку кажуть про підводний звуковий канал.

### 4 Спостерігаємо відбивання звуку

Якщо порівняти поширення звуку з поширенням світла, то можна помітити деякі спільні риси. І це не є випадковим: світло також є хвилею, але не механічною (про це ви дізнаєтесь пізніше). На межі поділу різних середовищ звукова хвиля, як і світло, зазнає заломлення, поглинання та відбивання. Зупинимося детальніше на відбиванні звуку.

Якщо стати недалеко від скелі або поодинокого хмарочоса та плеснути в долоні чи гучно крикнути, через невеликий інтервал часу почуємо повторення звуку. Це — *відлуння* (рис. 18.6).

**Відлуння** — це звук, відбитий від віддаленої перешкоди.

Якщо відстань до перешкоди є досить великою, а звук коротким (удар, оплеск, скрик), ми чуємо чітке повторення звуку. Якщо звук є довгим, то відлуння зміщується з первинним звуком і відбитий звук буде нерозбірливим.

**?** Чому, на вашу думку, під час грози, після того як пролунає перший удар грому, ми ще деякий час чуємо його гуркіт?

На явищі відбивання звуку ґрунтується дія шумозахисних екранів, які встановлюють уздовж автомобільних трас і біля аеропортів. Дослідження відбивання, розсіювання та згасання звуку в газах, рідинах і твердих тілах дозволяє отримати інформацію про внутрішню будову середовища, яким поширюється звук.

## 5 Розрізняємо інфразвук і ультразвук

Звукові хвилі, частота яких менша за 20 Гц, називають **інфразвуковими** (від латин. *infra* — нижче, під).

Інфразвукові хвилі виникають під час роботи деяких механізмів, у разі вибухів, обвалів, потужних поривів вітру, під час шторму, землетрусу тощо.

Інфразвук є дуже небезпечним для тварин і людини: він може викликати симптоми морської хвороби, запаморочення, засліплення, спричинити підвищену агресивність. У разі тривалої дії інтенсивне інфразвукове випромінювання може призвести до зупинки серця. При цьому людина навіть не розуміє, що відбувається, адже вона не чує інфразвук.

Звукові хвилі, частота яких перевищує 20 кГц, називають **ультразвуковими** (від латин. *ultra* — понад, за межами).

Ультразвук наявний у шумі вітру та водоспаду, у звуках, які видають деякі живі істоти. З'ясовано, що ультразвук до 100 кГц сприймають багато комах і гризунів (рис. 18.7); уловлюють такі коливання й собаки. Цікаво, що діти, на відміну від дорослих, також чують ультразвукові сигнали (до 24 000 Гц).

Деякі істоти застосовують ультразвук для орієнтації або полювання. Так, кажани



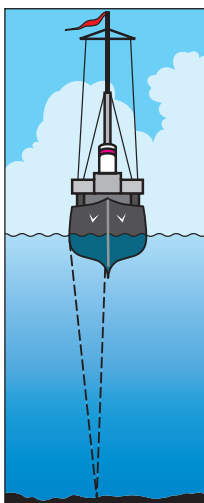
**Рис. 18.6.** Відлуння утворюється внаслідок відбивання звуку



**Рис. 18.7.** Ультразвуковий випромінювач для відлякування комах



**Рис. 18.8.** Під час полювання кажани «застосовують» ехолокацію



**Рис. 18.9.** Вимірювання глибини водойм за допомогою ехолокації

та дельфіни випромінюють ультразвук і сприймають його відлуння, завдяки чому вони навіть у повній темряві можуть знайти дорогу або спіймати здобич. Кажуть, що в таких випадках тварини користуються *ехолокацією* (рис. 18.8).

**Ехолокація** — спосіб виявлення й отримання інформації про об'єкт за допомогою відлуння.

Люди навчилися застосовувати ехолокацію в різних галузях, причому найчастіше для ехолокації використовують саме ультразвук.

Наприклад, у медицині ехолокація дозволяє «побачити» ще не народжене немовля, дослідити стан внутрішніх органів, виявити сторонні тіла в тканинах. У техніці ехолокацію застосовують для виявлення дефектів у виробках, вимірювання глибин морів і океанів (рис. 18.9) та ін.

Крім того, ультразвуком знезаражують хірургічні інструменти, ліки, руки хірургів тощо. Лікування за допомогою ультразвуку іноді дозволяє уникнути хірургічних операцій.

Ультразвук застосовують також для обробки міцних матеріалів, очищення поверхонь від забруднень тощо.

### Контрольні запитання



1. Що таке звук? 2. Наведіть приклади джерел і приймачів звуку. 3. Чому джерело звуку випромінює звук? 4. Від чого залежить швидкість поширення звуку? 5. Якою фізичною величиною визначається висота тону? 6. Чим визначається гучність звуку? 7. Наслідком якого явища є відлуння? 8. Що таке інфразвук? Як він впливає на людину? 9. Що таке ультразвук? Наведіть приклади застосування ультразвуку в природі, медицині, техніці. 10. Що таке ехолокація?



### Вправа № 18

1. Ніжки камертона коливаються із частотою 440 Гц. Чи сприймаємо ми хвилю, що поширюється від ніжок, як звук?
2. Чому метелика, який летить, не чути, а коли летить комар, ми чуємо дзижчання?
3. Визначте довжину звукової хвилі частотою 4 кГц у повітрі; воді; сталі.

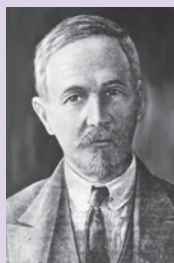
4. Чому музика і голоси співаків по-різному звучать у порожній залі й у залі, заповненій публікою?
5. За допомогою ультразвуку вимірювали глибину моря (див. [рис. 18.9](#)). Сигнал, відбитий від морського дна, було зафіксовано через 4 с після його відправлення. Якою є глибина моря в місці вимірювання?
6. Скільки коливань здійснює джерело звуку за 5 с, якщо довжина хвилі в повітрі дорівнює 1 м?
7. *Швидкість поширення звуку в металі* першим визначив французький фізик *Жан-Батист Біо* (1774–1862). Він використав чавунну трубу паризького водогону (завдовжки 951 м). Коли по одному кінцю труби вдаряли молотком, то з другого кінця чули подвійний удар. На скільки секунд звук, який ішов чавуном, обганяв звук, що йшов повітрям?
8. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, де використовують ультразвук.
9. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про вплив шуму на здоров'я людини. Як максимально зменшити шкідливу дію шуму?
10. Джерело світла і дзеркало розташовані на одній прямій на відстані 10,8 км одне від одного. Через який час спалах світла досягне дзеркала та повернеться назад?



### Експериментальні завдання

1. «*Майже Піфагор*». Дослідження звуків, які, коливаючись, видає струна, здійснював ще давньогрецький учений *Піфагор* (VI ст. до н. е). Він вивчав залежність висоти тону звуку від довжини струни. Скориставшись натягнутою ниткою, з'ясуйте, як висота тону залежить від довжини нитки.
2. «*Музична лінійка*». Повторіть дослід, зображений на [рис. 18.1](#). Зменшуючи довжину частини лінійки, що коливається, доведіть, що, чим ця довжина менша, тим більшою є частота випромінюваного звуку.
3. «*Чутлива кулька*». Використавши підвішену на нитці легку кульку, доведіть, що під час випромінювання звуку ніжки камертона коливаються, а гучність звуку залежить від амплітуди коливань.

## Фізика і техніка в Україні



**Борис Павлович Грабовський** (1901–1966) — український фізик і винахідник, творець електронної системи передавання рухомого зображення на відстані (на її принципах працює сучасне телебачення); син видатного українського поета Павла Грабовського.

Перший винахід Б. П. Грабовського — катодний комутатор, який став основою для побудови передавальної телевізійної трубки, а наступний — проект телеустановки, яку автор назвав «радіотелефот».

26 липня 1928 р. у Ташкенті відбувся експеримент, під час якого вперше у світі за допомогою електронного методу транслялося рухоме зображення (обличчя лаборанта).

Серед винаходів Бориса Грабовського — малолітражний гелікоптер, трикрилий планер, прилад для орієнтації сліпих і апарат для глухонімих. Запатентовану вченим ідею отримання катодного променя було успішно використано в Інституті електрозварювання, про що винахідникові писав особисто директор інституту академік Б. Є. Патон.

У 1977 р. в Ташкенті засновано Музей електронного телебачення імені Б. Грабовського. Є музей Бориса Грабовського в Тюмені, а також у селі Пушкарному (тепер Грабовському), що на Сумщині.

## i

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6



**Тема.** Дослідження звукових коливань різноманітних джерел звуку за допомогою сучасних цифрових засобів.

**Мета:** з'ясувати зв'язок між характеристиками звукової хвилі (амплітуда, частота) та гучністю й висотою тону звуку.

**Обладнання:** комп'ютер (або мобільний телефон) із програмним забезпеченням для запису звуку та обробки отриманого файлу (наприклад, аудіоредактор WavePad), мікрофон, камертон, генератор звукових частот (або програма «Камертон»).

### Теоретичні відомості

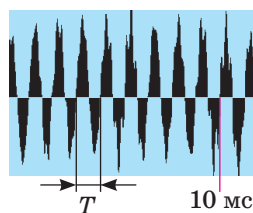
Форма запису звуку може бути різною: магнітна, оптична, цифрова тощо. Запис звуку в комп'ютерах — виключно цифровий. Записаний звук зберігається в аудіофайлі та після обробки може бути поданий на монітор комп'ютера у вигляді пульсуючого графіка, який відбиває зміну тиску в зоні прослуховування через рівні невеликі інтервали часу (див. рисунок).

За графіком можна оцінити:

- 1) *гучність звуку* — визначається амплітудою  $A$  звукової хвилі;
- 2) *тон звуку* — визначається частотою  $\nu$  (періодом  $T$ ) звукової хвилі.

Наприклад, за графіком на рисунку визначаємо, що за 10 мс відбулося майже 9 коливань (точніше — 8,8), отже, частота звукової хвилі становить:

$$\nu = \frac{8,8}{0,01 \text{ с}} = 880 \text{ Гц.}$$
 Таким чином, на графіку наведено цифровий запис звучання ноти «ля» другої октави (див. таблицю).



Ноти	Частота $\nu$ , Гц		Ноти	Частота $\nu$ , Гц	
	перша октава	друга октава		перша октава	друга октава
До	261,63	523,26	Соль	392,00	784,00
Ре	293,66	587,32	Ля	440,00	880,00
Мі	329,63	659,26	Сі	493,88	987,76
Фа	349,23	698,46			

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

#### Підготовка до експерименту

1. Перед тим як виконувати роботу, згадайте: 1) вимоги безпеки під час виконання лабораторних робіт; 2) основні характеристики звуку.
2. Увімкніть комп'ютер, приєднайте до нього мікрофон.
3. Запустіть на виконання програму «Звукозапис» (із набору стандартних програм ОС Windows), для чого клацніть кнопку «Пуск» і виберіть команди: Програми → Стандартні → Розваги → Звукозапис.

## ▶ Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника). Отримані аудіофайли збережіть під відповідними іменами.*

1. Увімкніть генератор звукової частоти, налаштуйте вихідний сигнал на частоту 440 Гц.
2. Увімкніть запис сигналу. Вимкніть запис через 4–6 с.
3. Збільште гучність сигналу генератора, не змінюючи частоти, і повторіть дії, описані в п. 2.
4. Налаштуйте вихідний сигнал на частоту 880 Гц і повторіть дії, описані в п. 2.
5. Поставте камертон. Вдарте по ньому гумовим молоточком і повторіть дії, описані в п. 2.
6. Проспівайте в мікрофон декілька нот, для кожної ноти повторюючи дії, описані в п. 2.

## ▶ Опрацювання результатів експерименту

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Для кожного дослідів визначте частоту звукової хвилі. Для цього:
  - 1) відкрийте аудіофайл (на екрані ви побачите графік, подібний до наведеного на рисунок);
  - 2) обчисліть кількість коливань, наприклад, за 10 мс;
  - 3) за формулою  $\nu = N/t$  обчисліть частоту звукової хвилі.

Номер дослідів	Назва дослідів	Час коливань $t$ , мс	Кількість коливань $N$	Частота хвилі $\nu$ , Гц
1				
...				

2. Зробіть скріншоти для будь-яких трьох дослідів, роздрукуйте їх та вклейте в зошит (або виконайте рисунки). Підпишіть ці дослідів.

## □ Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому: 1) отримані результати порівняйте із заданими частотами генератора, частотою камертона, табличними значеннями частот, що відповідають певним нотам; 2) зазначте причини можливої розбіжності результатів.

## \* Завдання «із зірочкою»

За формулою:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{v_{\text{виміряна}}}{v_{\text{задана}}} \right| \cdot 100\%$  оцініть відносну похибку одного з експериментів.

## + Творче завдання

Поміркуйте, який дослід слід провести, щоб виявити, які матеріали краще поглинають звук; якими матеріалами звук поширюється краще. Запишіть план експерименту. Проведіть експеримент, запишіть його результати.

## § 19. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

Чи читали вам у дитинстві казки? Напевно ж так. Згадайте: «котиться золоте яблучко срібним блюдечком», і герой казки бачить «гори високі, моря глибокі» та багато чого іншого, що відбувається за «сімома морями та сімома горами». Що вам нагадує цей казковий пристрій? Мабуть, у тому числі й мобільний Інтернет. Про те, які відкриття у фізиці дозволили винайти таку «казкову» річ, йдеться в цьому параграфі.



**Рис. 19.1.** Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — англійський фізик і математик, творець класичної електродинаміки, один із засновників статистичної фізики

### 1 Дізнаємося про електромагнітне поле

Перш за все згадаємо: існують два види матерії — *речовина* і *поле*. Обидва *існують реально*, а не являють собою певну «модель», призначену для того, щоб пояснити ті чи інші фізичні явища.

Минулого навчального року ви дізналися про *електричне поле*, цього року — про *магнітне поле*. Ви також з'ясували, що *магнітне поле, яке змінюється*, не тільки діє на рухомі заряджені частинки й намагнічені тіла, а й *створює електричне поле*. Такого висновку дійшов свого часу *М. Фарадей*.

Керуючись принципом симетрії, видатний англійський фізик *Джеймс Максвелл* (**рис. 19.1**) висунув підтвержену згодом гіпотезу про те, що не тільки змінне магнітне поле створює електричне поле, а й змінне електричне поле створює магнітне поле. Відповідно

до цієї гіпотези *електричні та магнітні поля завжди існують разом* і немає сенсу розглядати їх як окремі об'єкти. Тобто існує єдине **електромагнітне поле**, а електричне та магнітне поля — це дві складові (дві форми прояву) *електромагнітного поля*.

**Електромагнітне поле** — вид матерії, за допомогою якого здійснюється взаємодія між зарядженими тілами і частинками та намагніченими тілами.

Дехто з вас може не погодитися з висновком Максвелла, адже добре знає, що, наприклад, біля нерухомого зарядженого тіла існує тільки електричне поле, а біля нерухомого постійного магніту — тільки магнітне поле. Проте згадайте: рух і спокій залежать від вибору системи відліку.

Уявіть, що ви, тримаючи в руках заряджену кульку, йдете до свого товариша. Якби людина мала здатність завжди виявляти електромагнітне поле, то в цьому випадку ви «бачили» б тільки одну його складову — електричне поле, оскільки відносно вас заряд є нерухомим. Водночас ваш товариш «бачив» би як електричне поле, так і магнітне, тому що відносно нього заряд рухається й електричне поле змінюється (див. **рис. 19.2**).



**?** Якщо ваш товариш візьме магніт і понесе його від вас (див. рис. 19.3), хто з вас «виявить» тільки магнітне поле, а хто — і магнітне, й електричне?

Таким чином, твердження, що в даній точці існує тільки електричне (чи тільки магнітне) поле, не має сенсу, адже не вказано систему відліку. Разом із тим ми ніколи не знайдемо систему відліку, відносно якої «зникли» б обидві складові електромагнітного поля, адже *електромагнітне поле є матеріальним*.

## 2 Створюємо електромагнітні хвилі

Проаналізувавши всі відомі тоді закони електродинаміки, Дж. Максвелл суто математично отримав фантастичний на той час висновок: у природі мають існувати *електромагнітні хвилі*.

**Електромагнітна хвиля** — це поширення в просторі змінного електромагнітного поля.

Спробуємо уявити, як утворюється та поширюється електромагнітна хвиля. Візьмемо провідник, в якому тече змінний струм (рис. 19.4). Як відомо, біля будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле. Магнітне поле, створене змінним струмом, теж є змінним. Згідно з теорією Максвелла змінне магнітне поле має створити електричне поле, яке теж буде змінним. Змінне електричне поле створить змінне магнітне і т. д. Отже, одержимо *поширення коливань електромагнітного поля — електромагнітну хвилю* (рис. 19.5). Частота  $\nu$  цієї хвилі дорівнює частоті, з якою змінюється сила струму в провіднику, а *провідник зі змінним струмом є джерелом електромагнітної хвилі*.

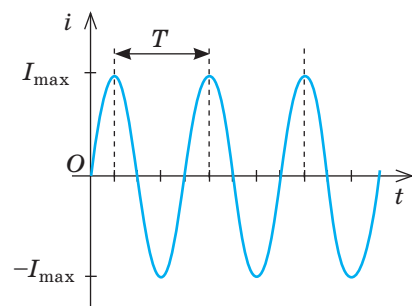
Аналогічно тому як механічна хвиля може відірватися від свого джерела (згадайте поширення хвилі від кинутого у воду камінця), електромагнітна хвиля теж може відірватися від свого джерела і почати самостійно поширюватись у просторі.



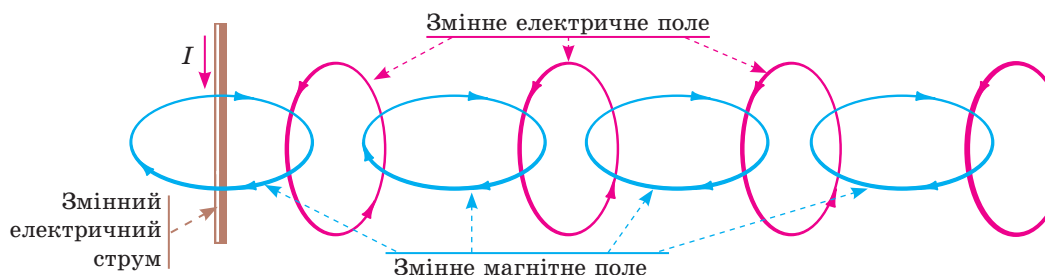
**Рис. 19.2.** У системі відліку, пов'язаній із хлопчиком, виявляється лише електрична складова електромагнітного поля. У системі відліку, пов'язаній із дівчинкою, виявляються обидві складові — й електрична, й магнітна



**Рис. 19.3.** До запитання в § 19



**Рис. 19.4.** Змінний струм — це струм, сила якого періодично змінюється: з часом значення сили струму то збільшується, то зменшується; змінюється й напрямок струму



**Рис. 19.5.** Схематичне зображення механізму поширення електромагнітної хвилі

Цікаво, що деякі електромагнітні хвилі «подорожують» у Всесвіті майже з початку його існування!

За теорією Максвелла, *джерелом електромагнітної хвилі може бути будь-яка заряджена частинка, що рухається з прискоренням* (тобто частинка, яка весь час змінює швидкість свого руху або за значенням, або за напрямком, або одночасно і за значенням, і за напрямком). Якщо ж частинка нерухома або рухається з незмінною швидкістю, біля неї існує електромагнітне поле, але електромагнітну хвилю частинка не випромінює.

Випромінюванням електромагнітних хвиль супроводжуються й деякі процеси, що відбуваються всередині молекул, атомів, ядер атомів (теорія таких процесів — *квантова теорія* — була створена в ХХ ст.).

### 3 Характеризуємо електромагнітну хвилю

Електромагнітна хвиля, як і механічна, характеризується *частотою* ( $\nu$ ), *довжиною* ( $\lambda$ ) і *швидкістю поширення* ( $v$ ). Так само, як у випадку з механічними хвилями, дані величини пов'язані *формулою хвилі*:

$$v = \lambda \nu$$

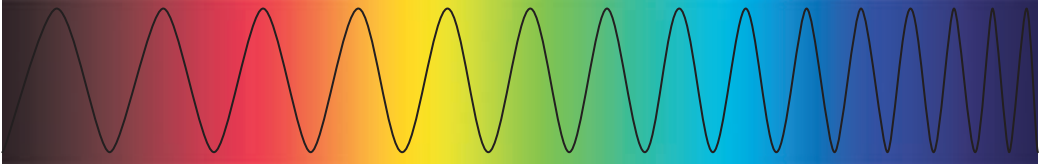
Але, на відміну від механічних хвиль, для поширення електромагнітних хвиль не потрібне середовище. Навпаки, найкраще й найшвидше електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі. Дж. Максвелл теоретично обчислив *швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі* й з подивом виявив, що отримане значення збігається зі значенням швидкості світла у вакуумі (на той час воно вже було виміряне експериментально):

$$v = c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Дж. Максвелл висунув слушне і сміливе на той час припущення: *світло є різновидом електромагнітних хвиль* (рис. 19.6). Учений не лише виявив природу світла, а й передбачив існування та властивості різних видів електромагнітних хвиль.

У вакуумі — і тільки в ньому — всі електромагнітні хвилі поширюються з однаковою швидкістю ( $c$ ), тому для вакууму довжина і частота електромагнітної хвилі пов'язані формулою:

$$c = \lambda \nu$$



**Рис. 19.6.** Світло — електромагнітні хвилі. Частота цих хвиль змінюється приблизно від  $4 \cdot 10^{14}$  Гц (червоний колір) до  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц (фіолетовий колір)

Під час переходу з одного середовища в інше швидкість поширення електромагнітної хвилі змінюється, змінюється і довжина хвилі, а от частота залишається незмінною. У повітрі швидкість поширення електромагнітних хвиль майже та сама, що й у вакуумі.

Через 15 років після створення теорія електромагнітного поля Максвелла була підтверджена експериментально: *Генріх Герц* (рис. 19.7) продемонстрував випромінювання і приймання електромагнітних хвиль. Герц не лише одержав електромагнітні хвилі, а й вивчив їхні властивості. Він установив, що *електромагнітні хвилі*:

- відбиваються від провідних предметів (кут відбивання дорівнює куту падіння);
- заломлюються на межі з діелектриком;
- частково поглинаються речовиною і частково розсіюються нею та ін.

Усі ці явища зумовлені дією електромагнітного поля на заряджені частинки в речовині. Так, якщо електромагнітна хвиля падає на поверхню металу, то на вільні електрони діє змінне електричне поле (електрична складова електромагнітної хвилі). Унаслідок цієї дії в поверхневому шарі металу виникають змінні електричні струми, які й випромінюють відбиту електромагнітну хвилю.



**Рис. 19.7.** Генріх Рудольф Герц (1857–1894) — німецький фізик, один із засновників електродинаміки



### Підбиваємо підсумки

Взаємодія заряджених частинок відбувається за допомогою електромагнітного поля. Електромагнітне поле має дві складові (дві форми прояву) — електричну складову (електричне поле) і магнітну складову (магнітне поле): магнітне поле, що змінюється, створює електричне поле, а електричне поле, що змінюється, створює магнітне поле.

Поширення в просторі змінного електромагнітного поля називають електромагнітною хвилею. Швидкість поширення хвилі, її довжина та частота пов'язані формулою хвилі:  $v = \lambda \nu$ . Найкраще й найшвидше електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є однаковою для будь-яких електромагнітних хвиль і дорівнює швидкості світла:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Світло теж є електромагнітною хвилею. Для вакууму формула хвилі має вигляд:  $c = \lambda \nu$ .

**Контрольні запитання**

1. У чому полягає гіпотеза Дж. Максвелла? 2. Дайте означення електромагнітного поля, назвіть його складові. 3. Наведіть приклади, що підтверджують відносність електричного та магнітного полів. 4. Як утворюється електромагнітна хвиля? Які об'єкти можуть її випромінювати? 5. Які фізичні величини характеризують електромагнітну хвилю? Як вони пов'язані? 6. Які властивості електромагнітних хвиль було встановлено в ході дослідів Г. Герца?

**Вправа № 19**

- Електромагніт підйомального крана живиться постійним струмом. Визначте:
  - в якому випадку електромагніт створює для оператора крана й електричне, й магнітне поля: а) електромагніт не рухається; б) електромагніт переносить вантаж;
  - в яких випадках електромагніт випромінює електромагнітні хвилі: а) в момент замикання кола; б) в момент розмикання кола; в) коли електромагніт, рухаючись рівномірно, переносить вантаж; г) коли нерухомий електромагніт тримає вантаж.
- Доповніть таблицю, вважаючи, що хвилі поширюються в повітрі.

Джерело хвилі	Довжина	Частота	Швидкість
Провід лінії електропередачі		50 Гц	
Радіопередавач	10 см		
Інфрачервоний випромінювач	1,5 мкм		

- За даними рис. 19.6 визначте довжини електромагнітних хвиль для світла фіолетового та червоного кольорів. Розгляньте два випадки: світло поширюється а) у вакуумі; б) у склі (показник заломлення скла для світла червоного кольору дорівнює 1,64, для світла фіолетового кольору — 1,67).
- Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про винайдення радіо. Зробіть коротке повідомлення.
- Човен гойдається у відкритому морі. Хвилі поширюються зі швидкістю 12 м/с; довжина хвилі 24 м. Яка частота ударів хвиль по корпусу човна? Яким є час між ударами?

**§ 20. ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ**

Зручний мобільний зв'язок, яскраве сонячне світло, жахливе радіоактивне випромінювання, корисний у невеликих дозах ультрафіолет, ласкаве тепло пічки, рентгенівські промені, що «бачать наскрізь»... Усе це — електромагнітні хвилі, вони мають спільну природу та поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю. Чому ж їхні властивості такі різні? Чи є між ними якась принципова різниця? Як утворюються різні види електромагнітних хвиль і де їх застосовують? Спробуємо розібратися.

**1****Розглядаємо шкалу електромагнітних хвиль**

Різні види електромагнітних хвиль передусім відрізняються частотою, а отже, й довжиною хвилі. Саме різницею частот пояснюється той факт, що деякі властивості електромагнітних хвиль суттєво різняться. Якщо

розташувати всі відомі електромагнітні хвилі в порядку збільшення їхньої частоти (рис. 20.1), побачимо, що частоти можуть різнитися більш ніж у  $10^{16}$  разів. Погодьтеся, це величезна різниця! І тому неважко уявити, наскільки різними можуть бути й властивості електромагнітних хвиль.

Подана на рис. 20.1 шкала електромагнітних хвиль поділена на ділянки, які відповідають різним діапазнам довжин і частот електромагнітних хвиль (різним видам електромагнітних хвиль). Хвилі одного діапазону мають однаковий спосіб випромінювання та схожі властивості.

**Радіохвилі** — від наддовгих із довжиною понад 10 км до ультракоротких і мікрохвиль із довжиною меншою 0,1 мм — породжуються змінним електричним струмом.

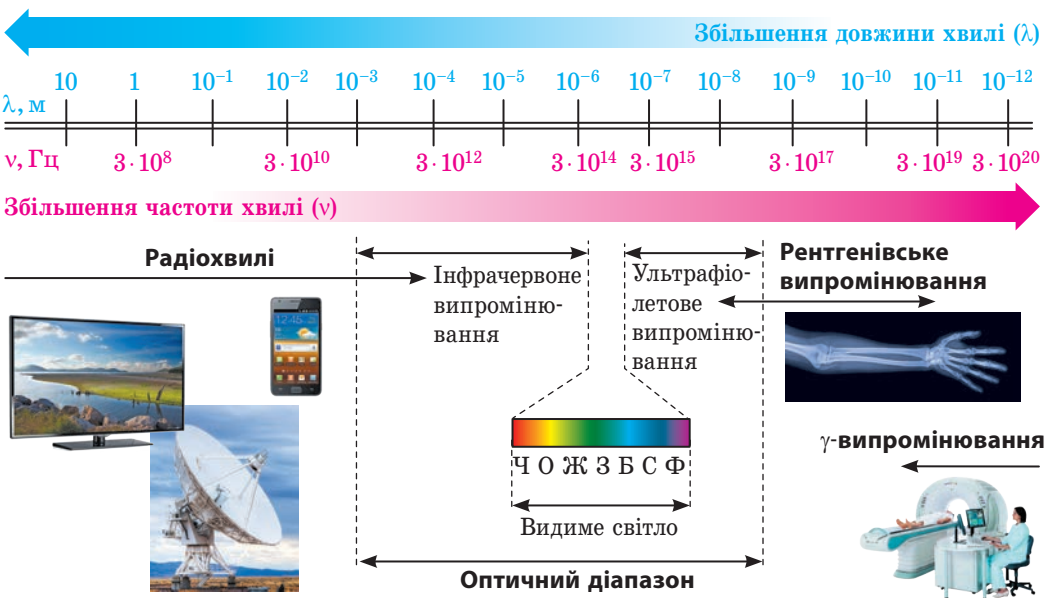
**Електромагнітні хвилі оптичного діапазону** випромінюються збудженими атомами. У цьому діапазоні розрізняють:

- *інфрачервоне (теплове) випромінювання* (довжина хвилі становить від 780 нм до 1–2 мм);
- *видиме світло* (довжина хвилі — 400–780 нм);
- *ультрафіолетове випромінювання* (довжина хвилі — 10–400 нм).

**Рентгенівське випромінювання** (довжина хвилі — 0,01–10 нм) виникає внаслідок швидкого (ударного) гальмування електронів, а також у результаті процесів усередині електронних оболонок атомів.

**$\gamma$ -випромінювання** (довжина хвилі менша 0,05 нм) випускається збудженими атомними ядрами під час ядерних реакцій, радіоактивних перетворень атомних ядер і перетворень елементарних частинок.

**?** Розгляньте шкалу електромагнітних хвиль (див. рис. 20.1). Чому, на вашу думку, деякі її ділянки віднесено одночасно до двох різних видів електромагнітних хвиль?



**Рис. 20.1.** Шкала (спектр) електромагнітних хвиль — безперервна послідовність частот і довжин існуючих у природі електромагнітних хвиль



**Рис. 20.2.** Мікрохвильова піч — пристрій, у якому використовують радіохвилі високої частоти (зазвичай  $2,45 \cdot 10^9$  Гц)

Із усього спектра найбільш спорідненим із організмом людини є *інфрачервоне випромінювання*. Хвилі довжинами приблизно від 7 до 14 мкм відповідають випромінюванню людського тіла й чинять на організм людини надзвичайно корисну дію. Найвідоміше природне джерело таких хвиль на Землі — це Сонце, а найвідоміше штучне — піч, і кожна людина обов'язково відчувала на собі їхній позитивний вплив.



## 2 Застосовуємо радіохвилі

Електромагнітні хвилі *радіодіапазону* застосовують найширше: сучасний мобільний зв'язок, радіомовлення, телебачення, виявлення, розпізнання та дослідження різноманітних об'єктів (радіолокація), визначення розташування транспортних засобів і людей (GPS-навігація, GPS-моніторинг та ін.), зв'язок із космічними апаратами тощо (рис. 20.2).

Радіохвилі зробили життя людини набагато комфортнішим. Ми не відчуваємо їх, хоча вони й впливають на загальний стан людей і тварин, причому чим коротші хвилі, тим виразніше реагують на них організми.

Потужні електромагнітні хвилі негативно впливають на людину. Медики стверджують, що стільниковий телефон — небезпечне джерело електромагнітного випромінювання, тим більше що він часто перебуває близько від мозку та очей людини. Поглинаючись тканинами головного мозку, зоровими та слуховими аналізаторами, хвилі передають їм енергію. Із часом це може призвести до порушень нервової, ендокринної та серцево-судинної систем.

## 3 Вивчаємо інфрачервоне випромінювання

Між радіохвилями і видимим світлом розташована ділянка *інфрачервоного (теплого) випромінювання*, яке в промисловості використовують для сушіння лакофарбових поверхонь, деревини, зерна та ін. Інфрачервоні промені застосовують у пультах дистанційного керування, системах автоматики, охоронних системах тощо. Ці промені не відволікають увагу людини, бо є невидимими. Але існують прилади, які можуть відчувати та перетворювати невидиме інфрачервоне зображення на видиме. Так працюють тепловізори — прилади нічного бачення, які «відчують» інфрачервоні хвилі довжиною 3–15 мкм. Такі хвилі випромінюються тілами, що мають температуру від  $-50$  до  $500$  °С.

Цікаво, що багато представників фауни мають своєрідні живі «прилади нічного бачення», які здатні сприймати інфрачервоні промені (рис. 20.3, 20.4).

#### 4 Дізнаємося про ультрафіолетове випромінювання

Ультрафіолетове випромінювання, на відміну від видимого світла та інфрачервоного випромінювання, має високу хімічну активність, тому його застосовують для дезінфекції повітря в лікарнях і місцях великого скупчення людей.

Основне джерело природного ультрафіолетового випромінювання — Сонце. Атмосфера Землі частково затримує ультрафіолетові хвилі: коротші від 290 нм (жорсткий ультрафіолет) затримуються у верхніх шарах атмосфери озоном, а завдовжки 290–400 нм (м'який ультрафіолет) поглинаються вуглекислим газом, водяною паром і озоном.

У великих дозах ультрафіолетове випромінювання є шкідливим для здоров'я людини (рис. 20.5). Щоб знизити ймовірність сонячного опіку та захворювань шкіри, лікарі рекомендують не перебувати влітку на сонці між 10 і 13 годинами, коли сонячне випромінювання є найінтенсивнішим. Разом із тим у невеликих кількостях ультрафіолет добре впливає на людину, адже сприяє виробленню вітаміну D, зміцнює імунну систему, стимулює низку важливих життєвих функцій в організмі.

#### 5 Рентгенівське і $\gamma$ -випромінювання

Найширше рентгенівське випромінювання застосовують у медицині, адже воно має властивість проходити крізь непрозорі предмети (наприклад, тіло людини). Кісткові тканини менш прозорі для рентгенівського випромінювання, ніж інші тканини організму людини, тому кістки чітко видно на рентгенограмі. Рентгенівську зйомку використовують також у промисловості (для виявлення дефектів), хімії (для аналізу сполук), фізиці (для дослідження структури кристалів).

Рентгенівське випромінювання чинить руйнівну дію на клітини організму, тому застосовувати його потрібно надзвичайно обережно.

$\gamma$ -випромінювання, яке має ще більшу проникну здатність, використовують у дефектоскопії (для виявлення дефектів усередині деталей); сільському господарстві



Рис. 20.3. Глибоководні кальмари крім звичайних очей мають ще термоскопічні — вони розташовані на хвості та вловлюють інфрачервоні промені



Рис. 20.4. Американська гримуча змія має надчутливий термолокатор, розташований у лицевій ямці між очима



Рис. 20.5. Ультрафіолетове випромінювання є особливо небезпечним для сітківки ока, тому високо в горах, де ультрафіолетові промені найменше поглинаються атмосферою, слід обов'язково захищати очі

та харчовій промисловості (для стерилізації харчів). На організм людини  $\gamma$ -випромінювання чинить дуже шкідливий вплив, разом із тим чітко спрямоване та дозоване  $\gamma$ -випромінювання застосовують у лікуванні онкологічних захворювань — для знищення ракових клітин (променева терапія).



### Підбиваємо підсумки

Спектр (шкала) електромагнітних хвиль — безперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі.

За способом випромінювання розрізняють: радіохвилі (створюються змінним електричним струмом); електромагнітні хвилі оптичного діапазону (інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолетове випромінювання; випускаються збудженими атомами); рентгенівське випромінювання (створюється під час швидкого гальмування електронів);  $\gamma$ -випромінювання (випускається збудженими атомними ядрами). Електромагнітні хвилі різних діапазонів мають різні властивості, тому по-різному впливають на людину і мають різні галузі застосування.

Усі види електромагнітних хвиль поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю. Зі збільшенням частоти хвилі (зі зменшенням її довжини) збільшуються проникна здатність і хімічна активність електромагнітного випромінювання.



### Контрольні запитання

1. Назвіть відомі вам види електромагнітних хвиль.
2. Що спільного між усіма видами електромагнітних хвиль? У чому їх відмінність?
3. Як змінюються властивості електромагнітних хвиль зі збільшенням їхньої частоти?
4. Наведіть приклади застосування різних видів електромагнітних хвиль.
5. Як уникнути негативного впливу деяких видів електромагнітного випромінювання на здоров'я людини?



### Вправа № 20

1. Розташуйте електромагнітні хвилі в порядку збільшення їхньої довжини: 1) видиме світло; 2) ультрафіолетове випромінювання; 3) радіохвилі; 4) рентгенівське випромінювання.
2. Установіть відповідність між випромінювачем та електромагнітними хвилями, які він здебільшого випромінює.
 

1 Мобільний телефон	А $\gamma$ -випромінювання
2 Батарея опалення	Б Рентгенівське випромінювання
3 Світлячок	В Інфрачервоне випромінювання
4 Радіоактивний препарат	Г Видиме світло
	Д Радіохвилі
3. Довжина хвилі світла жовтого кольору у вакуумі — 570 нм. Визначте частоту цієї хвилі.
4. Якою є довжина електромагнітної хвилі у вакуумі, якщо її частота дорівнює  $3 \cdot 10^{12}$  Гц? До якого діапазону належить ця хвиля?
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся історію винайдення будь-якого пристрою, дія якого ґрунтується на електромагнітному випромінюванні.
6. Відстань до перешкоди, яка відбиває звук, дорівнює 68 м. Через який час людина почує відлуння, якщо звукова хвиля поширюється в повітрі?





## § 21. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ БЕЗДРОТОВИХ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ. РАДІОЛОКАЦІЯ

Звернувшись до шкали електромагнітних хвиль (див. [рис. 20.1](#)), побачимо, що найбільша її ділянка належить радіохвилям. Оскільки частоти цих хвиль значно відрізняються, то різняться і їхні властивості. Докладніше про різні види радіохвиль ви дізнаєтесь у старшій школі, а зараз зупинимося лише на застосуванні *ультракоротких радіохвиль* (завдовжки від кількох сантиметрів до кількох метрів).

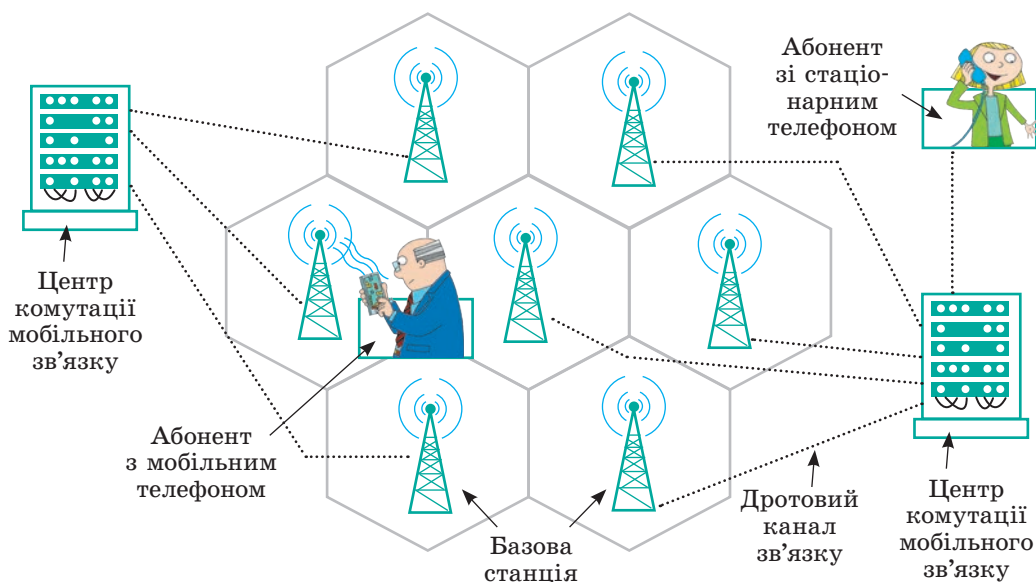
### 1 З'ясуємо особливості поширення ультракоротких радіохвиль

За своїми властивостями ультракороткі радіохвилі дуже близькі до світлових променів: вони поширюються в межах прямої видимості, їх можна посилати вузькими пучками. Саме ці властивості забезпечили широке застосування ультракоротких радіохвиль у радіолокації, бездротовому зв'язку, супутниковому телебаченні. Вузький промінь менше розсіюється (що дозволяє застосовувати менш потужні передавачі), його простіше приймати.

### 2 Дізнаємося, чому мобільний радіозв'язок називають стільниковим

**Стільниковий зв'язок** — один із видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить стільникова мережа.

Для стільникового зв'язку використовують електромагнітні хвилі частотою від 450 до 3000 МГц. Головна особливість такого зв'язку полягає в тому, що загальна зона покриття ділиться на невеликі ділянки — *стільники* (їх так називають, оскільки вони мають форму шестикутника). Кожен стільник має площу близько 25 км<sup>2</sup> і обслуговується окремою базовою станцією. Стільники, частково перекриваючись, утворюють мережу ([рис. 21.1](#)).



**Рис. 21.1.** Основні складові стільникової мережі: стільникові телефони, базові станції, центри комутації

Кожен із вас уміє користуватися мобільним телефоном. З'ясуємо, як він здійснює зв'язок. Коли ви вмикаєте телефон, він починає «прослуховувати» ефір і вловлює сигнал *базової станції* того стільника, де ви на даний момент перебуваєте. Після цього телефон випромінює радіосигнал — посилає станції свій ідентифікаційний код. Відтоді телефон і станція підтримуватимуть радіоконтакт, періодично обмінюючись сигналами.

Але ж ви не завжди перебуваєте в одному місці, і якщо з часом ви опинитеся в іншому стільнику, ваш телефон налагодить зв'язок із базовою станцією цього іншого стільника. Стільники частково перекриваються, тому ви навіть не помітите, що вас почала обслуговувати інша станція. А от якщо телефон не зможе «знайти» найближчу станцію і передати їй свій код, зв'язок обірветься і на дисплеї висвітиться, що мережа відсутня.

Описаними процесами «керують» *центри комутації*, які пов'язані з базовими станціями дротовими каналами зв'язку. Власне центр комутації безперервно «відстежує» місце перебування вашого мобільного телефону. Він «передає» вас, як естафетну паличку, від однієї базової станції до іншої, коли ви «подорожуєте» зі стільника в стільник. Саме через центри комутації здійснюється вихід на інші мережі: ви можете зателефонувати товаришеві, телефон якого обслуговується іншим оператором, зробити дзвінок на стаціонарний телефон, скористатись Інтернетом тощо.

### 3 Вивчаємо радіолокацію

Властивість радіохвиль відбиватися від металів установив Г. Герц. Згодом було з'ясовано, що електромагнітні хвилі відбиваються від будь-яких тіл, при цьому чим краще тіло проводить електричний струм, тим більшою буде енергія відбитої хвилі. *На відбиванні радіохвиль ґрунтується радіолокація.*

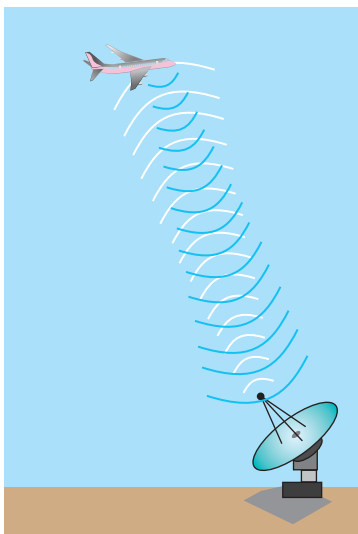


Рис. 21.2. Принцип роботи радіолокатора

**Радіолокація** — спосіб виявлення, розпізнання та визначення місця розташування об'єктів за допомогою радіохвиль.

Радіолокаційна установка — **радіолокатор (радар)** — забезпечує випромінювання радіохвиль, а також приймання радіохвиль, які відбиваються від об'єкта (рис. 21.2).

Якщо радіохвилі випромінювати в усіх напрямках або широким пучком, то вони відбиватимуться одночасно від багатьох об'єктів і розпізнати, де розташований досліджуваний об'єкт, наприклад літак, буде неможливо. Тому радіолокатор посилає хвилі *напрявлено та вузьким пучком*, а виявлення відбитого сигналу свідчить, що досліджуваний об'єкт розташований у напрямку поширення радіохвиль (рис. 21.3).

Розрізняють два основні режими роботи радіолокатора. У режимі *пошуку (сканування)* антена радіолокатора весь час сканує простір (наприклад, повертається по горизонталі

й одночасно рухається вниз-угору). У режимі спостереження антена весь час напрямлена на обраний об'єкт.

#### 4 Дізнаємося, як працює радіолокатор

Радіосигнал, який посилає радіолокатор, являє собою короточасний (тривалістю мільйонні частки секунди), але дуже потужний імпульс. Щойно імпульс послано, антена радіолокатора автоматично перемикається на прийом: радіолокатор «слухає» ефір — чекає на відбитий сигнал. Приймач має високу чутливість (відбитий радіосигнал досить слабкий), тому на час випромінювання імпульсу його відключають, інакше апаратура зіпсується.

Через певний інтервал часу (значно більший за тривалість імпульсу) антена знову перемикається на радіопередавач і радіолокатор посилає наступний імпульс.

Відстань  $s$  до об'єкта визначають за часом  $t$  проходження радіоімпульсу до цілі й назад. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у повітрі практично дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), тому:

$$s = \frac{c \cdot t}{2}$$

Інтервал часу  $t$  є дуже малим. Так, якщо відстань до об'єкта дорівнює 120 км, то відбитий радіосигнал повернеться через 0,8 мс  $\left( t = \frac{2s}{c} \right)$ .

#### 5 Застосовуємо радіолокацію

Радіолокатори було створено виключно для озброєння армій — для виявлення літаків супротивника (рис. 21.4).

Із часом радіолокація набула широкого застосування в інших галузях. Сучасні повітряні, морські й океанські судна обов'язково оснащені радіолокаторами. За допомогою радіолокатора штурман судна може знайти вільні проходи між хмарами або айсбергами, уникнути зіткнення з іншими суднами в негодю, уточнити курс, визначити місце свого розташування (рис. 21.5).

Радіолокаційні станції в аеропортах допомагають здійснити посадку повітряних



**Рис. 21.3.** Випромінювання вузького направленого пучка ультракоротких радіохвиль і приймання відбитого сигналу забезпечує параболічна антена радіолокатора



**Рис. 21.4.** Сучасний «літаючий радар» може виявити літак супротивника на відстані 540 км



**Рис. 21.5.** Радар сучасного морського судна

суден, а станції, встановлені вздовж узбережжя, забезпечують безпечний вхід кораблів у порт.

Радіолокацію застосовують у наукових дослідженнях, метеорології, сільському та лісовому господарстві. Вона допомагає скласти карти рельєфу земної поверхні, дослідити щільність рослинного покриву, виявити лісову пожежу, визначити склад ґрунту тощо.

Важливе значення має радіолокація в космічних дослідженнях. Запуски та посадки космічних апаратів неможливі без використання радіолокаторів. За допомогою радіолокації було уточнено відстані до Місяця, Венери, Марса. Радіолокатори, встановлені на штучних супутниках Венери, допомогли проникнути крізь товщу хмар цієї планети та визначити її рельєф.



### Підбиваємо підсумки

Останнім часом особливо широкого застосування набули хвилі ультракороткого діапазону: за допомогою спеціальних антен їх можна спрямувати вузьким пучком, який менше розсіюється, а це дозволяє використовувати менш потужні передавачі. Ультракороткі радіохвилі застосовують у стільниковому зв'язку, супутниковому телебаченні, радіолокації.

Стільниковий зв'язок — один із видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить стільникова мережа.

Радіолокація — виявлення, розпізнання та визначення місця розташування об'єктів за допомогою радіохвиль. Радіолокатор створює вузький напрямлений пучок радіохвиль і приймає радіохвилі, відбиті від об'єктів. Відстань до об'єкта визначають за часом проходження радіоімпульсу до об'єкта й назад:  $s = \frac{ct}{2}$ .



### Контрольні запитання

**1.** У чому полягає основна перевага ультракоротких радіохвиль? **2.** Що таке стільниковий зв'язок? Як він організований? **3.** Що таке радіолокація? На чому вона ґрунтується? **4.** Опишіть принцип роботи радіолокатора. **5.** Як за допомогою радіолокації визначають місце розташування об'єкта (відстань до об'єкта, напрямок, в якому він розташований)? **6.** Де застосовують радіолокацію?



### Вправа № 21

- На якій відстані виявлено об'єкт, якщо відбитий сигнал повернувся через 20 нс після посилання?
- Радіолокатор працює на частоті  $6 \cdot 10^8$  Гц. Радіохвилю якої довжини він випромінює?
- Особливості ультракоротких радіохвиль (практично не відбиваються від іоносфери, їхня енергія помітно втрачається тільки поблизу поверхні Землі, їх можна спрямувати вузьким пучком) забезпечили їх широке застосування. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, як організовані супутникове телебачення та супутниковий зв'язок.
- Застосування радіолокаційних станцій для виявлення воєнних машин (літаків, кораблів) спричинило активний пошук способів зниження помітності воєнної техніки. Так з'явилася *стелс-технологія*. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, чи вдалося хоча б частково «сховати» воєнні машини. Якщо вдалося, то як?

## Дистанційне зондування Землі

*Дистанційне зондування Землі* (ДЗЗ) — це спостереження й вивчення поверхні Землі за допомогою приладів, розміщених від неї на далекій відстані (наприклад, на супутниках або літаках). Де використовують ДЗЗ?

Із технічної точки зору, найпростіша галузь застосування ДЗЗ — прогноз погоди. На цьому прикладі й розповімо, як працює система.

Зазвичай телевізійні прогнози погоди супроводжуються знімками з космосу (рис. 1). Проте яскраві картини на телеекрані — це, звісно, не все, що потрібно для прогнозу погоди!

Супутник не може сфотографувати всю поверхню Землі відразу. Як фари автомобіля освітлюють тільки дорогу, залишаючи узбіччя в темряві, так і супутник, облітаючи навколо Землі, «бачить» тільки певну смугу. Ширина цієї смуги може коливатися від 7 до 1500 км і залежить від необхідної точності обстеження: чим більш детальна інформація одержується, тим вужча смуга.

Під час наступного оберту супутник «оглядає» суміжну смугу і так далі. Якщо об'єднати отримані дані від кількох таких смуг, можна одержати «картинку» для великої території, наприклад для всієї нашої країни (рис. 2).



**Рис. 2.** Карта України із супутника



**Рис. 1.** Телевізійний прогноз погоди з використанням супутникових знімків

Супутник передає отриману інформацію на приймальні антени; інформацію обробляють і перетворюють на звичні фотографії. Потім інформація передається метеорологам, які об'єднують дані з космосу з результатами наземних спостережень і на основі складних математичних моделей прогнозують температуру та стан атмосфери на день, тиждень, місяць...

Для аналізу стану поверхні Землі використовують цілу «армію» супутників. Більшість із них одержують дані в діапазоні видимих оком електромагнітних хвиль, але є й такі, які зондують поверхню електромагнітними пучками в діапазоні хвиль сантиметрових довжин (НВЧ-випромінювання), а також хвиль із більшою довжиною (понад 1 м).

Одержанням і обробкою даних від супутників займаються різні організації; в нашій країні роботу таких організацій координує *Державне космічне агентство України*.

Окрім прогнозу погоди дані з космосу використовують для аналізу стану снігового покриву, прогнозу паводків, пожеж, посухи, землетрусів, оцінки майбутніх урожаїв і для багато чого іншого. Наприклад, щоб запобігти аварії через зіткнення з льодами, капітанам кораблів важливо знати льодову обстановку. Такі дані теж одержують із космосу.

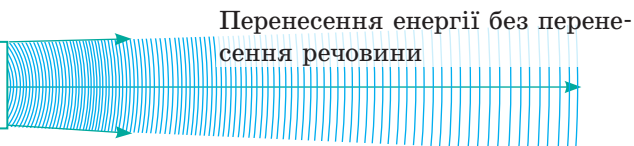
## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ III «Механічні та електромагнітні хвилі»

1. Ви довідалися про існування *механічних хвиль* та їх *види*.

### МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ

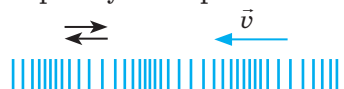
**Механічна хвиля** — поширення коливань у пружному середовищі.

Джерело хвилі —  
тіло, яке коливається



#### Поздовжні

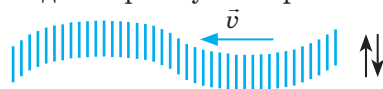
Частинки коливаються вздовж  
напрямку поширення хвилі



Стиснення та розтягнення  
середовища

#### Поперечні

Частинки коливаються перпендику-  
лярно до напрямку поширення хвилі



Відносний зсув шарів середовища

2. Ви дізналися про *фізичні величини*, які *характеризують механічні хвилі*, та встановили співвідношення між ними.

### ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ

**Частота хвилі**

$$[\nu] = 1 \text{ Гц}$$

Дорівнює частоті ко-  
ливань джерела хвилі

**Швидкість поширення хвилі**

$$[v] = 1 \text{ м/с}$$

Змінюється під час переходу  
з одного середовища в інше

**Довжина хвилі**

$$[\lambda] = 1 \text{ м}$$

$$\text{Формула хвилі: } v = \lambda \nu$$

3. Ви ознайомилися зі звуковими хвилями та з'ясували, що *звукові хвилі* — це *поздовжні механічні хвилі певної частоти*.

### ЗВУКОВІ ХВИЛІ

**Інфразвук**

(1 мГц — 20 Гц)

Чинить негативний  
вплив на здоров'я  
людини

**Чутний звук**

(20 Гц — 20 кГц)

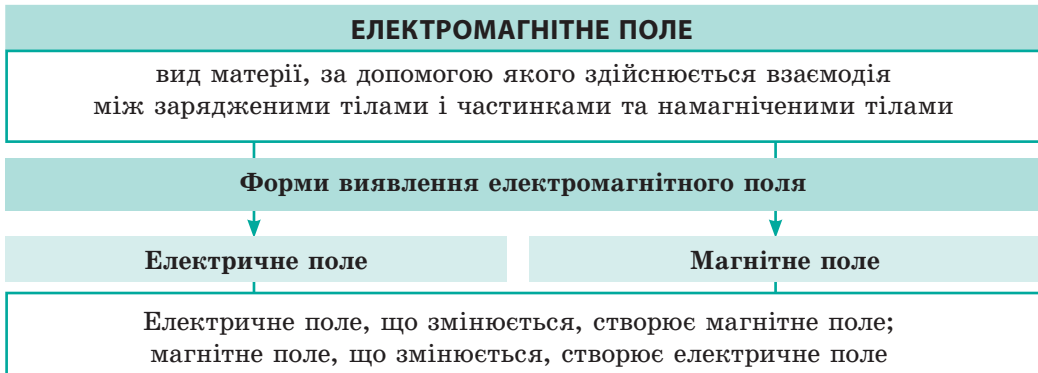
**Висота звуку** визначається  
частотою звукової хвилі;  
**гучність** — амплітудою

**Ультразвук**

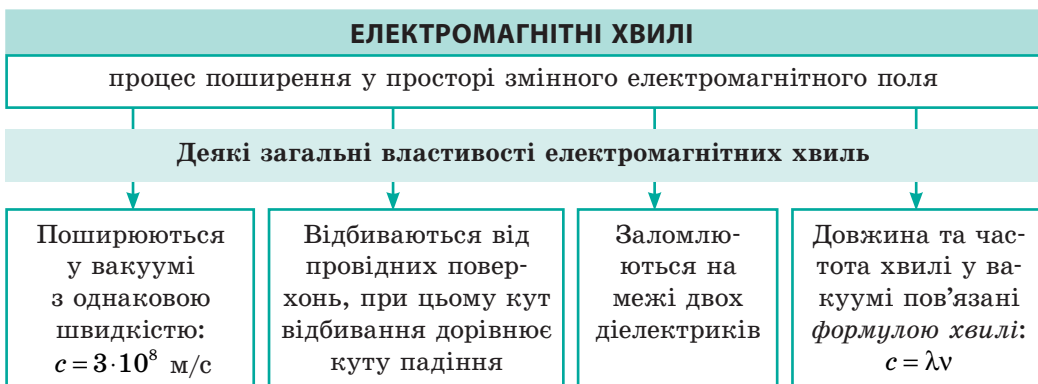
(понад 20 кГц)

Використовують у ме-  
дицині, дефектоскопії,  
ехолокації

4. Ви дізналися, що теоретичні дослідження *Дж. Максвелла* та численні експерименти довели нерозривний зв'язок між електричними і магнітними полями. Ці поля утворюють єдине електромагнітне поле.



5. Ви дізналися, що в природі існують *електромагнітні хвилі*, ознайомились із властивостями електромагнітних хвиль різних діапазонів і деякими прикладами їхнього застосування.



*Збільшується частота, зменшується довжина електромагнітної хвилі* →

Радіохвилі	Оптичний діапазон			Рентгєнівське випромінювання	γ-випромінювання
	інфрачервоне випромінювання	видиме світло	ультрафіолетове випромінювання		

→ *Збільшується проникна здатність, посилюються хімічна активність*

6. Ви з'ясували, що на властивостях *ультракоротких радіохвиль* поширюватися вузьким пучком і відбиватися від перешкод ґрунтується **радіолокація** — виявлення, розпізнання та визначення місця розташування об'єктів за допомогою радіохвиль. Відстань  $s$  до об'єкта визначають за часом  $t$  проходження радіоімпульсу до об'єкта та назад:

$$s = \frac{ct}{2}$$

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ III «Механічні та електромагнітні хвилі»

*Завдання 1–8 містять тільки одну правильну відповідь.*

- (1 бал) На якій властивості механічних хвиль ґрунтується ехолокація?
  - перенесення енергії без перенесення речовини;
  - відбивання хвилі;
  - залежність довжини хвилі від середовища, в якому поширюється хвиля;
  - зміна амплітуди хвилі зі збільшенням відстані до джерела хвилі.
- (1 бал) У якому середовищі поширюються поперечні механічні хвилі?
  - у рідині;
  - у вакуумі;
  - у будь-якому середовищі;
  - у твердому тілі.
- (1 бал) Яке твердження є хибним?
  - Поздовжні механічні хвилі не поширюються у твердих тілах.
  - Механічні хвилі не поширюються у вакуумі.
  - Світло — це електромагнітна хвиля.
  - Звук — це механічна хвиля.
- (1 бал) Який об'єкт може бути джерелом механічної хвилі?
  - заряджена частинка, що рухається прискорено;
  - тіло, яке коливається;
  - тіло, що рухається рівномірно;
  - нерухоме намагнічене тіло.
- (1 бал) Постійний магніт лежить на сидінні трамвая, який рухається рівномірно. Відносно якого із зазначених спостерігачів існує лише магнітна складова електромагнітного поля?
  - кондуктор, який іде проходом;
  - пасажир зустрічного автомобіля;
  - пішохід, що стоїть біля дороги;
  - водій автобуса, що рухається за трамваем із такою самою швидкістю.
- (2 бали) Коли хвиля переходить в інше середовище, то *не* змінюється:
  - амплітуда хвилі;
  - довжина хвилі;
  - частота хвилі;
  - швидкість поширення хвилі.
- (2 бали) Яке природне явище *не* супроводжується появою механічних хвиль?
  - веселка;
  - блискавка;
  - землетрус;
  - вітер.
- (2 бали) На відстані 170 м від хмарочоса стоїть людина. Із її рук на тротуар падає металевий предмет. Через який час після удару людина може почути відлуння?
  - 0,5 с;
  - 1 с;
  - 2 с;
  - 4 с.
- (2 бали) На якій відстані розташований об'єкт, якщо відбитий від нього радіосигнал повернувся через 2 нс після випромінювання?



10. (3 бали) Установіть відповідність між приймачем і видом електромагнітних хвиль, які він переважно приймає.
- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 Прилад нічного бачення | А $\gamma$ -промені           |
| 2 Супутникова антена     | Б Радіохвилі                  |
| 3 Око людини             | В Інфрачервоне випромінювання |
|                          | Г Видиме світло               |
11. (3 бали) Натягнутим шнуром поширюється хвиля (рис. 1). У якому напрямку рухається точка А в зафіксований на рисунку момент часу?
12. (3 бали) Швидкість руху кулі дорівнює 680 м/с. На скільки раніше куля влучить у мішень, розташовану на відстані 1360 м, ніж до мішені долине звук пострілу?
13. (3 бали) Робоча бджола, що летить за взятком, робить у середньому 180 помахів крилами за секунду. Коли ж ця бджола повертається до вулика, кількість помахів крилами за секунду зростає до 280. Як це відбивається на звуці, який ми чуємо?
14. (4 бали) Якою є довжина звукової хвилі в повітрі, якщо джерело звуку здійснює 5100 коливань за хвилину? Якою є довжина цієї хвилі у воді?
15. (4 бали) За графіком коливань джерела механічної хвилі (рис. 2) визначте період коливань і частоту хвилі. Якою є довжина хвилі, якщо хвиля поширюється зі швидкістю 20 м/с?
16. (4 бали) Радіохвилі, довжина яких 6 м, переходять із вакууму в середовище, де швидкість їхнього поширення в 1,5 разу менша, ніж у вакуумі. Визначте частоту і довжину радіохвилі.

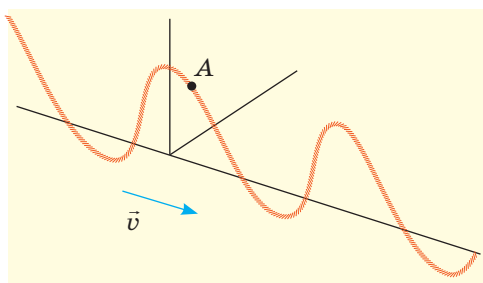


Рис. 1

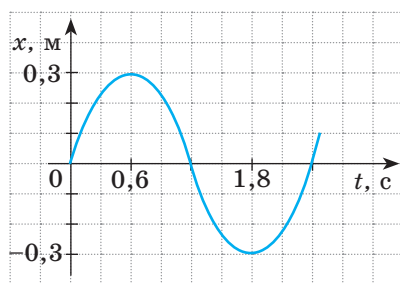


Рис. 2

*Зверте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## Орієнтовні теми проектів

1. Звуки в житті людини.
2. Застосування інфра- й ультразвуку в техніці.
3. Вібрації й шуми та їхній вплив на організми.
4. Електромагнітні хвилі в природі й техніці.
5. Вплив електромагнітного випромінювання на організм людини.
6. Види шумового забруднення. Вимірювання рівня шумового забруднення. Вивчення впливу шумового забруднення на організми.
7. Музичні інструменти як джерела різних звукових хвиль.

## Теми рефератів і повідомлень

1. Механізм утворення хвиль на поверхні води.
2. Дивовижне відлуння.
3. Що таке акустичні резонатори та де їх застосовують.
4. Ефект Допплера та його використання для контролю швидкості руху транспортних засобів.
5. Чоловічі, жіночі, дитячі голоси: як і чому вони відрізняються.
6. Засоби захисту від шумів у мегаполісах.
7. Ультразвукова кавітація.
8. Застосування ультразвуку в техніці.
9. Утворення інфразвуку в океані.
10. Візуалізація звукових коливань.
11. Радіохвилі в нашому житті.
12. Історія винайдення радіо.
13. Електромагнітний смог.
14. Використання радіолокації в астрономії.
15. Ефект Допплера в астрономії, або Як доведено, що галактики розлітаються.
16. Дія ультрафіолетового випромінювання на організм людини.
17. В. Рентген чи І. Пуллой: хто першим відкрив X-промені?
18. Історія вивчення світлових явищ.

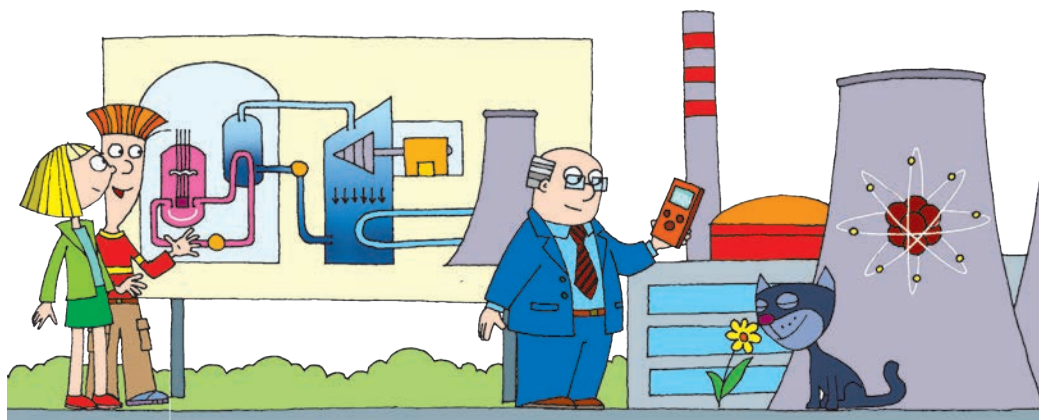
## Теми експериментальних досліджень

1. Виготовлення різноманітних джерел звуку та вивчення їхніх акустичних характеристик.
2. З'ясування залежності висоти звуку від частоти коливань джерела звукових хвиль.
3. Вивчення процесів відбиття, заломлення та накладання механічних хвиль на поверхні води.

# РОЗДІЛ IV

## ФІЗИКА АТОМА ТА АТОМНОГО ЯДРА. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

- Ви знаєте, як працює тепловий двигун, а тепер дізнаєтесь, як працює ядерний реактор
- Ви чули, що радіація завдає шкоди, а тепер дізнаєтесь, як вона лікує
- Ви знаєте, що життя на Землі неможливе без сонячної енергії, а тепер дізнаєтесь, звідки Сонце її «бере»
- Ви знаєте, що однойменні заряди відштовхуються, а тепер дізнаєтесь, коли вони притягуються
- Ви можете розрахувати, скільки теплоти виділиться під час згоряння 1 кг дров, а тепер зможете обчислити кількість теплоти, що виділиться під час «згоряння» 1 кг урану



## § 22. СУЧАСНА МОДЕЛЬ АТОМА. ПРОТОННО-НЕЙТРОННА МОДЕЛЬ ЯДРА АТОМА. ЯДЕРНІ СИЛИ. ІЗОТОПИ

Історія фізичної науки налічує майже 2500 років, але тільки минулого століття фізики перетворилися з поважних викладачів і кабінетних учених на консультантів урядів. Кількість фахівців-фізиків збільшилася в сотні разів, було створено величезні підприємства для виробництва фізичних приладів і обладнання (рис. 22.1). І сталося це передусім завдяки успіхам ядерної фізики, яка вивчає структуру та властивості атомних ядер, процеси, що в них відбуваються, та механізми перетворення атомних ядер. У цьому параграфі ви детальніше дізнаєтесь про атом і атомне ядро.

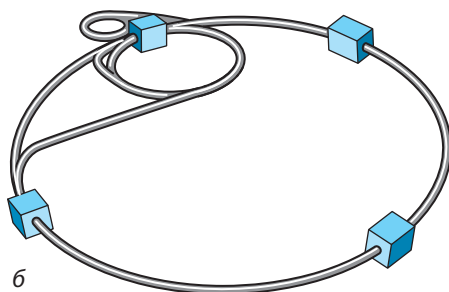
### 1 Дізнаємося про класичний дослід Резерфорда

Експерименти, здійснені вченими протягом XIX ст., довели, що атом має складну структуру. Фізикам стало відомо, що до складу атома входять електрони, які мають негативний заряд, а власне атом є нейтральним.

У 1908–1911 рр. під керівництвом *Ернеста Резерфорда* (рис. 22.2) досвідчений дослідник *Ганс Гейгер* (1882–1945) і молодий аспірант *Ернест Марсден* (1889–1970) проводили серію дослідів щодо з'ясування структури атома. Для дослідів учені використали речовину, із якої з великою швидкістю вилітали позитивно заряджені частинки — так звані  *$\alpha$ -частинки* (*альфа-частинки*).

Вузкий пучок  $\alpha$ -частинок зі свинцевого контейнера спрямовувався на тонку золоту фольгу, а далі потрапляв в екран, покритий шаром кристалів цинк сульфід (рис. 22.3). Якщо в такий екран улучала  $\alpha$ -частинка, то в місці її влучання відбувався слабкий спалах світла. Учені спостерігали спалахи за допомогою мікроскопа та реєстрували влучання  $\alpha$ -частинок в екран.

У результаті дослідів було з'ясовано, що переважна більшість  $\alpha$ -частинок проходить крізь золоту фольгу, не змінюючи напрямку руху, деякі відхиляються від початкової траєкторії. А от приблизно одна з 20 000 частинок відскакувала від фольги, начебто натикаючись на якусь перешкоду (рис. 22.4).



**Рис. 22.1.** Найбільша на сьогодні дослідницька установка — прискорювач заряджених частинок, перший запуск якого відбувся в 2008 р.: а — вигляд ізсередини; б — схематичне зображення. Вражають розміри цього прискорювача: елементарні частинки розганяються у величезному кільці завдовжки 26 км. Країни Європи мусили об'єднати свої зусилля, щоб побудувати це диво техніки

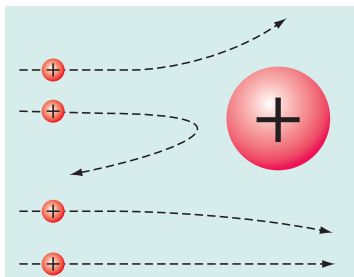
Зрозуміло, що Е. Резерфорд не міг бачити внутрішню структуру атома, тому він залучив логіку. Якщо позитивний заряд і маса рівномірно розподілені по всьому об'єму атома (а саме таке уявлення про атом існувало на той час), то всі  $\alpha$ -частинки повинні були пролетіти крізь фольгу практично не відхиляючись, адже їхня енергія величезна (це приблизно як бити м'ячем крізь павутиння).

Якщо ж позитивний заряд і маса зосереджені в невеликому об'ємі всередині атома, а навколо — «порожнеча», то бомбардування  $\alpha$ -частинками нагадуватиме кидки тенісними м'ячиками через поле, на якому розташована закріплена на жердині металева банка. Тільки в мізерній кількості випадків м'ячики влучать у банку та відскочать від неї, решта ж пролетить повз.

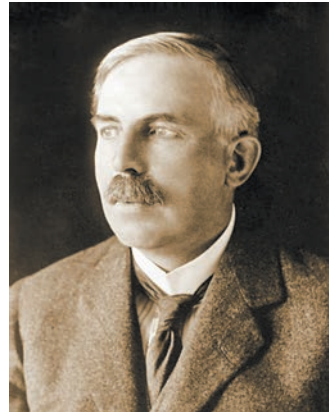
Очевидно, що друге припущення значно більше підходить для пояснення результатів експерименту. Таким чином, після зазначених дослідів Резерфорд у 1911 р. запропонував *ядерну модель будови атома*: атом складається з позитивно зарядженого ядра, оточеного негативно зарядженими частинками — електронами; саме в ядрі зосереджена мало не вся маса атома.

**?** На вашу думку, чи відскочила б  $\alpha$ -частинка в досліді Резерфорда, якби ядро мало негативний заряд? якби маса ядра була набагато меншою від маси  $\alpha$ -частинки?

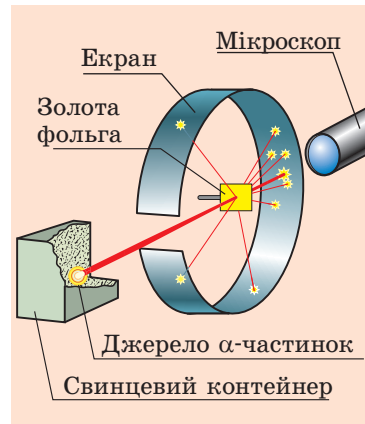
Хоча в ядрі зосереджена майже вся маса атома, розмір ядра порівняно з атомом надзвичайно малий (діаметр атома становить приблизно  $10^{-10}$  м, а ядра —  $10^{-15}$  м). Для наочності



**Рис. 22.4.** Траєкторії  $\alpha$ -частинок, що пролітають поряд із ядром Ауруму. Чим ближче до ядра пролітає  $\alpha$ -частинка, тим більша сила відштовхування, яка діє на неї, і тим більше частинка відхиляється від початкової траєкторії



**Рис. 22.2.** Ернест Резерфорд (1871–1937) — видатний англійський фізик. Заклав основи вчення про радіоактивність і будову атома, здійснив першу ядерну реакцію. Лауреат Нобелівської премії (1908 р.), член усіх академій наук світу



**Рис. 22.3.** Схема дослід з розсіяння  $\alpha$ -частинок (дослід Резерфорда)

уявіть, що атом вдалося збільшити до розміру великого стадіону. При цьому розмір ядра такого атома теж має зрости. На скільки? Обчислення показують, що діаметр ядра атома дорівнював би розміру мурахи, що повзе по траві стадіону.

Ядерна модель атома, запропонована Резерфордом, була розвинена в роботах видатного данського фізика *Нільса Бора* (1885–1962). Саме на ядерній моделі ґрунтується сучасне уявлення про будову атома (рис. 22.5).

## 2 Згадуємо будову атомного ядра

Із курсів фізики і хімії ви добре знаєте, що атомне ядро складається із частинок двох видів: **протонів**, які мають позитивний електричний заряд, і **нейтронів**, які не мають заряду. Маса протона приблизно дорівнює масі нейтрона та майже у 2000 разів більша за масу електрона. Протони й нейтрони, що входять до складу ядра атома, називають **нуклонами**. Сумарну кількість протонів і нейтронів в атомі називають **нуклонним (масовим) числом** і позначають символом  $A$ .

Атом є електрично нейтральним: сумарний заряд протонів у ядрі дорівнює сумарному заряду електронів, що розташовані навколо ядра. Оскільки заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона, то зрозуміло, що *в атомі кількість протонів дорівнює кількості електронів*.

Кількість протонів у ядрі називають **зарядовим (протонним) числом** і позначають символом  $Z$ . Порядковий номер елемента в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва відповідає *кількості протонів у ядрі* (зарядовому числу).

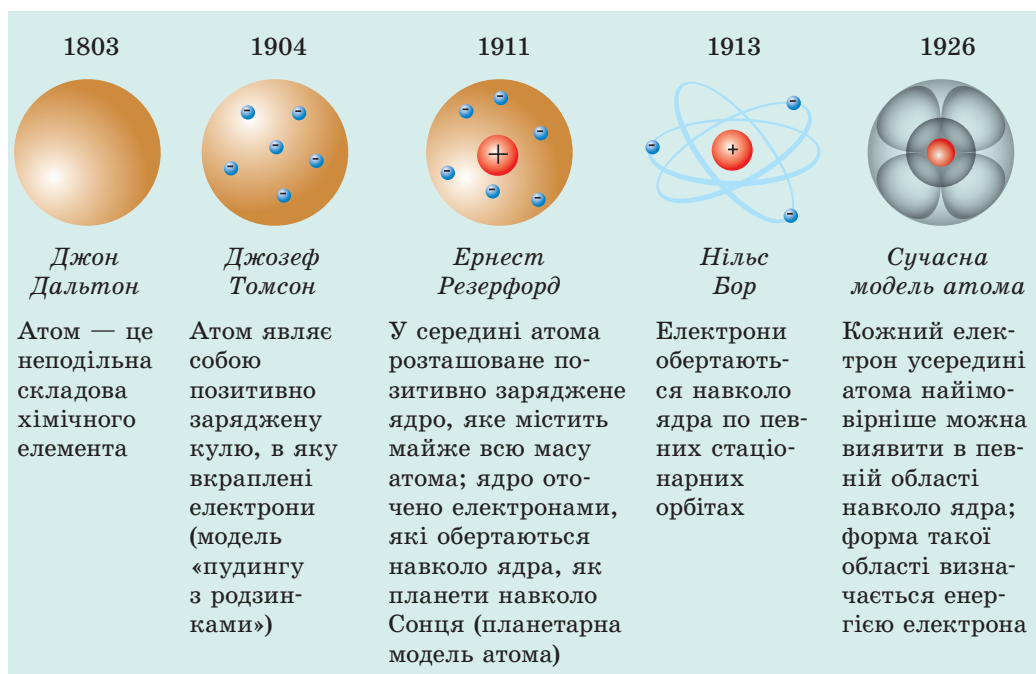


Рис. 22.5. «Еволюція» моделі атома

Знаючи зарядове ( $Z$ ) і масове ( $A$ ) числа ядра атома, можна визначити *кількість нейтронів* ( $N$ ) у цьому ядрі:  $N = A - Z$ .

Вид атомів, який характеризується певним значенням зарядового числа та певним значенням масового числа, називають **нуклідом** (рис. 22.6)

**?** Скільки протонів і нейтронів містить ядро нукліда Алюмінію ( ${}^{27}_{13}\text{Al}$ )?

Якщо різні нукліди мають однакове зарядове число, то їхні хімічні властивості є однаковими — нукліди належать одному хімічному елементу.

Різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких містять однакове число протонів, але різну кількість нейтронів, називають **ізотопами** («однакові за місцем»).

Кожний хімічний елемент має декілька ізотопів (рис. 22.7).

### 3 Дізнаємося про сильну взаємодію

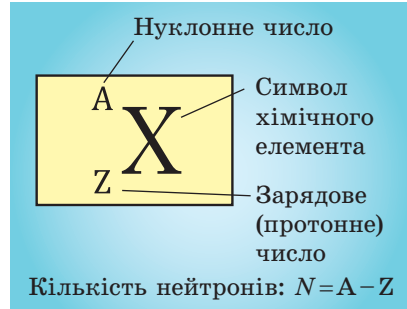
Ви вже знаєте, що електрони, маючи негативний заряд, утримуються навколо позитивного ядра завдяки електромагнітній взаємодії. Але яким чином у складі одного ядра і на дуже близькій відстані один від одного утримуються протони, адже однойменно заряджені частинки відштовхуються?

З'ясовано, що всі частинки в ядрі притягуються одна до одної завдяки взаємодії, яка в сотні разів сильніша, ніж електромагнітне відштовхування протонів (рис. 22.8). Саме тому взаємодію нуклонів називають **сильною взаємодією**.

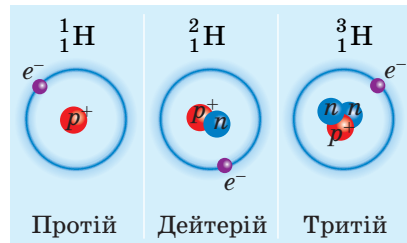
Сили, які діють між протонами й нейтронами в ядрі та забезпечують існування атомних ядер, називають **ядерними силами**.

**Основні властивості ядерних сил:**

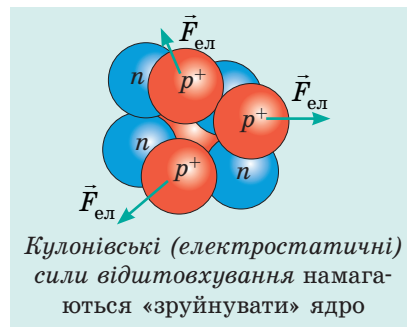
- 1) є тільки силами притягання;
- 2) є близькодійчими: вимірювання показали, що ядерні сили між нуклонами



**Рис. 22.6.** Позначення нукліда хімічного елемента



**Рис. 22.7.** Ізотопи Гідрогену, які існують у природі. Символом  $e^-$  позначено електрони,  $p^+$  — протони,  $n$  — нейтрони



**Рис. 22.8.** Сили взаємодії між нуклонами ядра

Відкриття будови атомного ядра сміливо можна назвати «міжнародним».

Протон відкрив англійський фізик, уродженець Нової Зеландії *Ернест Резерфорд* (1911 р.), нейтрон — англійський фізик *Джеймс Чедвік* (1932 р.). Гіпотезу про протонно-нейтронну будову ядра атома вперше незалежно один від одного висловили радянський учений, уродженець Полтавщини *Дмитро Дмитрович Іваненко* і німецький учений *Вернер Гейзенберг* (1932 р.). Відтоді уявлення про будову ядра практично не змінилися.

виявляються лише на відстанях, які приблизно дорівнюють розмірам нуклона ( $10^{-15}$  м);

3) *не залежать від заряду*: на однаковій відстані сили, що діють між двома протонами, між двома нейтронами або між протоном і нейтроном, є однаковими;

4) мають *властивість насичення*: нуклон виявляється здатним до ядерної взаємодії одночасно лише з невеликою кількістю нуклонів-«сусідів».



### Підбиваємо підсумки

У результаті дослідів під керівництвом Е. Резерфорда було створено ядерну модель будови атома, згідно з якою весь позитивний заряд атома зосереджений у його ядрі — частині, розміри якої незначні порівняно з розмірами атома.

Ядра атомів складаються з нуклонів — протонів і нейтронів. Кількість про-

тонів ( $Z$ ) у ядрі атома даного елемента дорівнює порядковому номеру цього елемента в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва, кількість нуклонів ( $A$ ) — масовому числу.

Вид атомів, який характеризується певною кількістю протонів і певною загальною кількістю нуклонів, називають нуклідом.

Різновиди хімічного елемента, атоми яких містять у своїх ядрах однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називають ізотопами даного хімічного елемента.

У ядрі нуклони утримуються разом завдяки дії ядерних сил. Ядерні сили є близькодійучими — на відстанях, більших за розмір нуклона, вони не виявляються.



### Контрольні запитання

1. Опишіть дослід Е. Резерфорда із розсіяння  $\alpha$ -частинок та його результати.
2. Із яких частинок складається атом? атомне ядро?
3. Що таке зарядове число? масове число?
4. Як визначити кількість протонів і нейтронів у ядрі? Наведіть приклад.
5. Що таке нуклід?
6. Які нукліди називають ізотопами? Назвіть ізотопи Гідрогену.
7. Який тип взаємодії забезпечує утримання нуклонів у ядрі атома?
8. Дайте означення ядерних сил, назвіть їхні властивості.



### Вправа № 22

1. Скільки протонів і скільки нейтронів міститься в ядрі атома Аргону  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ ?
2. Чим відрізняються ядра ізотопів Урану:  ${}_{92}^{238}\text{U}$  і  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ?
3. У ядрі атома Бору міститься 5 протонів і 6 нейтронів. Скільки електронів у цьому атомі? скільки нуклонів у ядрі цього атома?



4. Серед поданих символів хімічних елементів визначте той, що відповідає атому з найбільшою кількістю електронів: Ca, Cu, Ge, Sb, P. Скористайтеся Періодичною системою хімічних елементів Д. І. Менделєєва.
5. Оцініть силу ядерної взаємодії між протонами ядра на відстані  $10^{-15}$  м.
6. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про життя й наукову діяльність нашого співвітчизника Дмитра Дмитровича Іваненка.

## § 23. РАДІОАКТИВНІСТЬ. РАДІОАКТИВНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

У XXI ст. навряд чи знайдеться доросла людина, яка хоча б раз у житті не зробила рентгенівський знімок. А от наприкінці XIX ст. зображення руки людини з видимою структурою кісток (рис. 23.1) обійшло шпальти газет усього світу, а для фізиків стало справжньою сенсацією. Учені розпочали дослідження рентгенівських променів і пошук їхніх джерел. Одним із таких учених був французький фізик А. Беккерель (рис. 23.2). Якими несподіваними висновками закінчилося його дослідження, ви дізнаєтесь із цього параграфа.



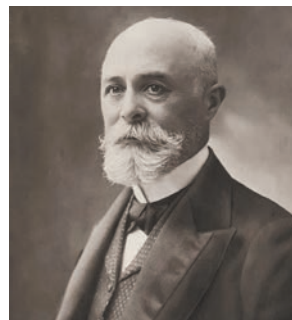
**Рис. 23.1.** Перший рентгенівський знімок руки людини

### 1 Дізнаємося про історію відкриття радіоактивності

Із відкриття рентгенівських променів почалася історія відкриття радіоактивності, й допоміг у цьому випадок.

Поштовок до досліджень стало припущення вчених, що рентгенівські промені можуть виникати під час короткотривалого світіння деяких речовин, опромінених перед тим сонячним світлом\*. До таких речовин належать, наприклад, деякі солі Урану. Такою сіллю і скористався А. Беккерель, щоб перевірити зазначене припущення.

Знаючи, що рентгенівські промені, на відміну від світлових, проходять крізь чорний папір, учений узяв загорнуту в чорний папір фотопластинку\*\*, поклав на неї крупинки уранової солі й на кілька годин виніс фотопластинку на яскраве сонячне світло. Після проявлення на фотопластинці виявилися



**Рис. 23.2.** Анрі Антуан Беккерель (1852–1908) — французький фізик, у 1896 р. відкрив радіоактивне випромінювання солей Урану

\* Таке світіння називають *флюоресценцією*.

\*\* *Фотопластинка* — скляна пластинка, вкрита чутливою до випромінювання речовиною.

Альберт Ейнштейн порівнював відкриття радіоактивності з відкриттям вогню, оскільки вважав, що вогонь і радіоактивність — однаково значущі віхи в історії людства.



**Рис. 23.3.** Марія Склодовська-Кюрі (1867–1934) — французький фізик і хімік (походила з Польщі), лауреат двох Нобелівських премій. Такої честі за всю історію були удостоєні тільки троє дослідників



**Рис. 23.4.** П'єр Кюрі (1859–1906) — французький фізик, лауреат Нобелівської премії

темні плями саме в тих місцях, де лежала уранова сіль. Таким чином було з'ясовано, що уранова сіль дійсно випускає випромінювання, яке має велику проникну здатність і діє на фотопластинку.

Беккерель вирішив продовжити дослідження й підготував дослід, який дещо відрізнявся від попереднього. Проте вченому завадила похмура погода, і він із жалем поклав готову до дослідження фотопластинку з урановою сіллю та мідним хрестом між ними в шухляду стола. Через кілька днів, так і не дочекавшись появи сонця, учений вирішив про всяк випадок проявити фотопластинку. Результат був несподіваним: на пластинці з'явився контур хреста. Тож сонячне світло тут ні до чого, і *сіль Урану сама, без впливу зовнішніх факторів, випускає невидиме випромінювання, якому не є перешкодою навіть шар міді!*

Пізніше таке випромінювання назвуть **радіоактивним випромінюванням** (від латин. *radio* — випромінюю, *activus* — дієвий); здатність речовин до радіоактивного випромінювання — **радіоактивністю**; нукліди, ядра яких мають таку здатність, — **радіонуклідами**.

## 2 Дізнаємося про радіонукліди

«Чи тільки Уран випускає “промені Беккереля”?» — саме з пошуку відповіді на це запитання почала свою роботу з вивчення радіоактивності *М. Склодовська-Кюрі* (рис. 23.3). Ретельно перевіривши на радіоактивність практично всі відомі на той час елементи, вона виявила, що радіоактивні властивості має також Торій. Крім того, *М. Склодовська-Кюрі* та її чоловік *П. Кюрі* (рис. 23.4) відкрили й нові радіоактивні елементи, зокрема Полоній і Радій.

**?** Поміркуйте, що підштовхнуло подружжя Кюрі назвати елементи саме так.

Згодом виявили, що радіоактивність є властивою всім без винятку нуклідам хімічних елементів, порядковий номер яких більший за 82 ( $Z > 82$ ). Проте й всі інші елементи мають радіоактивні нукліди (природні або одержані штучно).

### 3 Вивчаємо склад радіоактивного випромінювання

Досліди з вивчення природи радіоактивного випромінювання показали, що радіоактивні речовини можуть випромінювати промені трьох видів: позитивно заряджені частинки ( $\alpha$  (альфа)-випромінювання), негативно заряджені частинки ( $\beta$  (бета)-випромінювання) і нейтральні промені ( $\gamma$  (гамма)-випромінювання). На рис. 23.5 зображено схему одного з таких дослідів: пучок радіоактивного випромінювання потрапляє спочатку в сильне магнітне поле постійного магніту, а потім на фотопластинку. Після проявлення фотопластинки на ній чітко видно три темні плями.

? Згадайте, напрямок руху яких частинок прийнято за напрямок електричного струму, та, скориставшись рис. 23.5 і правилом лівої руки, переконайтеся, що  $\alpha$ -частинки мають позитивний заряд.

Найбільший внесок у вивчення  $\alpha$ -випромінювання зробив Е. Резерфорд. Учений одним із перших з'ясував, що  $\alpha$ -випромінювання — це потік ядер атомів Гелію ( ${}^4_2\text{He}$ ), які рухаються зі швидкістю порядку  $10^7$  м/с. Заряд  $\alpha$ -частинки дорівнює двом елементарним зарядам:  $q_\alpha = +2|e| \approx +3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл.

$\beta$ -випромінювання, як і  $\alpha$ -випромінювання, відхиляється магнітним полем, але в протилежний бік. Виявлено, що  $\beta$ -випромінювання — це потік електронів ( ${}^0_{-1}e$ ), які летять із величезною швидкістю (наближеною до швидкості поширення світла).

? Сподіваємося, що вам не складно буде записати заряд і масу  $\beta$ -частинки.

Вивчення  $\gamma$ -випромінювання показало, що це електромагнітні хвилі надзвичайно високої частоти (понад  $10^{18}$  Гц). Швидкість поширення цих хвиль у вакуумі становить  $3 \cdot 10^8$  м/с.

### 4 Захищаємося від радіоактивного випромінювання

У більшості людей слово «радіація» асоціюється з небезпекою. І це, безумовно, правильно. Радіоактивне випромінювання не фіксується органами чуття людини, проте відомо, що воно може призвести до згубних наслідків. Від впливу радіації можна захиститися, побудувавши на шляху випромінювання перешкоду.

Простіше за все захиститися від  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювань. Хоча  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинки летять із величезною швидкістю, їх потік легко зупиняє навіть тонка перешкода. Як показали експерименти, достатньо тонкого аркуша

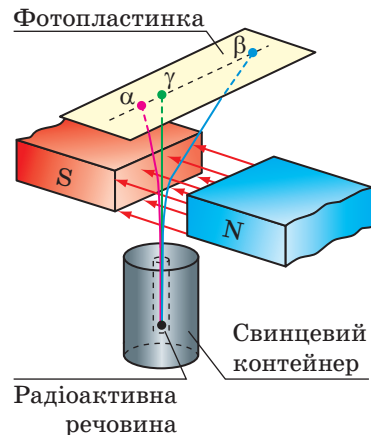


Рис. 23.5. Схема дослідів з вивчення природи радіоактивного випромінювання

#### Види радіоактивного випромінювання

$\alpha$ -частинки — ядра атомів Гелію  
 $\beta$ -частинки — швидкі електрони  
 $\gamma$ -промені — високочастотне (короткохвильове) електромагнітне випромінювання

паперу (0,1 мм), щоб зупинити  $\alpha$ -частинки;  $\beta$ -випромінювання повністю поглинається, наприклад, алюмінієвою пластинкою завтовшки 1 мм (рис. 23.6).

Найважче захиститися від  $\gamma$ -випромінювання — воно проникає крізь доволі товсті шари матеріалів. В окремих випадках для захисту від  $\gamma$ -випромінювання необхідні бетонні стіни завтовшки кілька метрів.

### 5 Даємо означення радіоактивності

Вивчення радіоактивності показало, що радіоактивне випромінювання є наслідком перетворень ядер атомів. Причому ці перетворення відбуваються довільно (без жодних причин), їх не можна прискорити або сповільнити, вони не залежать від зовнішнього впливу, тобто на них не впливають зміни тиску й температури, дія магнітного та електричного полів, хімічні реакції, зміна освітленості тощо.

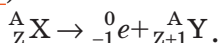
**Радіоактивність** — здатність ядер радіонуклідів довільно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок.

Випромінюючи  $\alpha$ - чи  $\beta$ -частинки, вихідне (*материнське*) ядро перетворюється на ядро атома іншого елемента (*дочірнє* ядро);  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпади можуть супроводжуватися  $\gamma$ -випромінюванням. З'ясовано, що радіоактивні перетворення підпорядковуються так званим *правилам зміщення*.

1. Під час  $\alpha$ -розпаду кількість нуклонів у ядрі зменшується на 4, протонів — на 2, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на 2 одиниці менший від порядкового номера вихідного елемента (рис. 23.7):



2. Під час  $\beta$ -розпаду кількість нуклонів в ядрі не змінюється, при цьому кількість протонів збільшується на 1, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на одиницю більший за порядковий номер вихідного елемента (рис. 23.8):



❓ Відомо, що Радон ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ) є  $\alpha$ -радіоактивним. Ядро якого елемента утвориться в результаті  $\alpha$ -розпаду Радону?

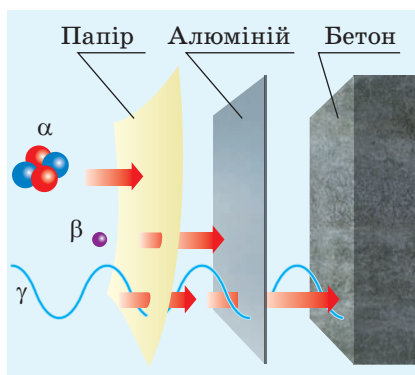


Рис. 23.6. Захист від радіоактивного випромінювання

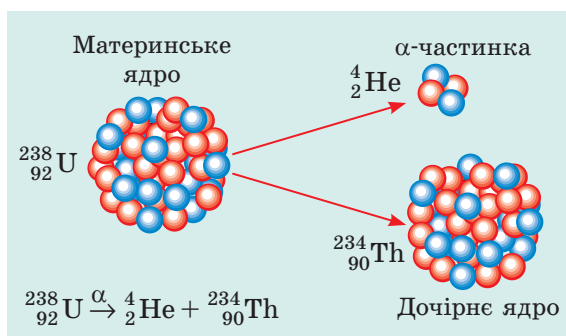
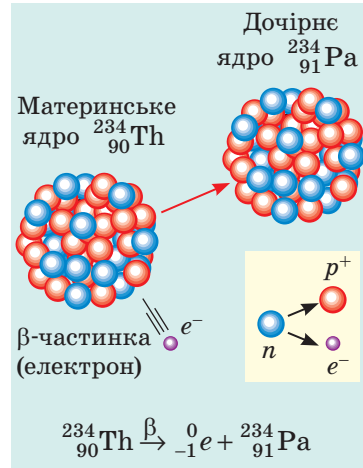


Рис. 23.7. Під час  $\alpha$ -розпаду материнське ядро спонтанно розпадається на дві частини:  $\alpha$ -частинку і дочірнє (нове) ядро

**\* 6 Дізнаємося про радіоактивні ряди**

Виходить, що після пояснення радіоактивності мрія алхіміків Середньовіччя про перетворення речовин на золото здійснилася? Насправді — ні. Учені з'ясували, що вихідне (материнське) ядро атома радіоактивного елемента X може зазнавати цілої низки перетворень: ядро атома елемента X перетворюється на ядро атома елемента Y, потім на ядро атома елемента Z і т. д., однак у цьому ланцюжку не може бути випадкових «гостей».

Сукупність усіх ізотопів, які виникають у результаті послідовних радіоактивних перетворень даного материнського ядра, називають **радіоактивним рядом**. Один із ланцюжків таких перетворень подано на рис. 23.9. Виявлено, що існують *чотири радіоактивні ряди*, які об'єднують усі відомі в природі радіоактивні елементи: ряд Торію (починається з Торію-232), ряд Урану-Радію (починається з Урану-238); ряд Урану-Актинію (починається з Урану-235); ряд Нептунію (починається з Нептунію-237). ←



**Рис. 23.8.** Під час β-розпаду один із нейтронів материнського ядра перетворюється на протон і електрон; електрон випромінюється, а протон залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

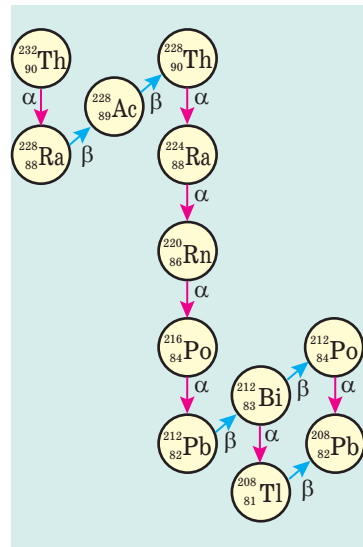


**Підбиваємо підсумки**

Радіоактивне випромінювання відкрив французський фізик А. Беккерель.

Більшість існуючих у природі та штучно отриманих нуклідів є радіоактивними: їхні ядра довільно розпадаються, випромінюючи мікрочастинки та перетворюючись на інші ядра.

Види радіоактивного випромінювання		
α-частинки	β-частинки	γ-промені
потік ядер Гелію	потік електронів	електромагнітні хвилі
$v_\alpha$ порядку $10^7$ м/с	$v_\beta$ близько $3 \cdot 10^8$ м/с	$v_\gamma = c = 3 \cdot 10^8$ м/с
$q_\alpha = +2e$	$q_\beta = -e$	не заряджені
затримуються аркушем паперу завтовшки 0,1 мм	затримуються листом алюмінію завтовшки 1 мм	затримуються шаром бетону завтовшки декілька метрів



**Рис. 23.9.** Радіоактивний ряд Торію. Ряд починається з Торію-232, який зустрічається в природі, і закінчується Плюмбумом-208, який є стабільним (не радіоактивним)



### Контрольні запитання

1. Як було відкрито явище радіоактивності? 2. Наведіть приклади природних радіоактивних елементів. 3. Опишіть дослід із вивчення природи радіоактивного випромінювання. 4. Які види радіоактивного випромінювання ви знаєте? 5. Якою є фізична природа  $\alpha$ -;  $\beta$ -;  $\gamma$ -випромінювання? 6. Як захиститися від радіоактивного випромінювання? 7. Наведіть означення радіоактивності. 8. Що відбувається з ядром атома під час випромінювання  $\alpha$ -частинки?  $\beta$ -частинки?

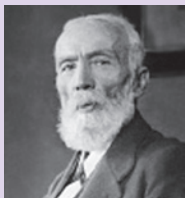


### Вправа № 23

1. Які види радіоактивного випромінювання діяли на фотопластинку в дослідях А. Беккереля? Розгляньте два випадки: а) крупинки солі Урану покладено безпосередньо на чорний папір, у який загорнута пластинка; б) сіль Урану покладено на мідний хрест, який, у свою чергу, покладено на загорнуту в чорний папір фотопластинку.
2. Довжина хвилі  $\gamma$ -випромінювання у вакуумі 0,025 нм. Визначте її частоту.
3. Skorиставшись рис. 23.9, запишіть кілька рівнянь реакцій розпаду, характерних для радіоактивного ряду Торію-232.
4. Під час природного радіоактивного розпаду радію ( ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ ) із його ядра випускається  $\beta$ -частинка. На ядро якого елемента перетворюється при цьому ядро атома Радію? Запишіть рівняння реакції.
5. Визначте масу  $\alpha$ -частинки, знаючи, що маса протона і маса нейтрона приблизно дорівнюють  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг. Якою є кінетична енергія  $\alpha$ -частинки, якщо вона рухається зі швидкістю  $1,5 \cdot 10^7$  м/с?
6. «Все є отрута, і все є ліки, — це залежить від дози». Ця фраза належить відомому лікарю епохи Відродження *Парацельсу* (справжнє ім'я — Філіп Авреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгайм (1493–1541)). Skorистайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, як шкідливе радіоактивне випромінювання використовують для лікування хворих.
7. Маємо 2 моль урану і 2 моль гелію. Скільки атомів у кожній речовині?



### Фізика і техніка в Україні



**Іван Павлович Пулюй** (1845–1918) — український фізик, електротехнік, винахідник. Ще за 14 років до Вільгельма Рентгена він сконструював трубку, яка згодом стала прообразом сучасних рентгенівських апаратів. І. П. Пулюй набагато глибше за Рентгена проаналізував природу та механізми виникнення X-променів (пізніше їх було названо рентгенівськими), а також на прикладах продемонстрував їх суть.

І. П. Пулюй одним із перших почав конструювати й виготовляти вакуумні пристрої. Широко відомою стала винайдена вченим люмінесцентна газорозрядна лампа, яка увійшла в історію техніки як «лампа Пулюя» (Pulujlampe). Знімки в X-променях, виконані Пулюєм за допомогою цієї лампи, найчастіше відтворювались у європейських науково-популярних виданнях як неперевершені за якістю для ілюстрації застосування цих променів у медицині.

Одна із розробок ученого — запатентований винахід, який дав змогу використовувати лінію передачі змінного струму для одночасного телефонного зв'язку.

Ім'я І. П. Пулюя носить Тернопільський національний технічний університет. НАНУ заснувала премію імені Івана Пулюя — за видатні роботи в галузі прикладної фізики.

## § 24. АКТИВНІСТЬ РАДІОАКТИВНОЇ РЕЧОВИНИ. ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ІЗОТОПІВ

Чи можна дізнатися, яке саме ядро в певній радіоактивній речовині розпадеться першим? Яке буде наступним? Яке розпадеться останнім? Фізики стверджують, що дізнатися про це неможливо: розпад того чи іншого ядра радіонукліда — подія випадкова. Разом із тим поведінка радіоактивної речовини в цілому підлягає чітко визначеним закономірностям.

### 1 Дізнаємося про період піврозпаду

Якщо взяти закриту скляну колбу, що містить певну кількість Радону-220, то виявиться, що приблизно через 56 с кількість радону в колбі зменшиться вдвічі. Ще через 56 с із решти атомів знову залишиться половина і т. д. Отже, зрозуміло, чому інтервал часу 56 с був названий *періодом піврозпаду* Радону-220.

**Період піврозпаду**  $T_{1/2}$  — це фізична величина, що характеризує радіонуклід і дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер даного радіонукліда.

Одиниця періоду піврозпаду в СІ — секунда:

$$[T_{1/2}] = 1 \text{ с.}$$

У кожного радіонукліда — свій період піврозпаду (див. [таблицю](#)).

? Зразок містить  $6,4 \cdot 10^{20}$  атомів Йоду-131. Скільки атомів Йоду-131 буде в зразку через 32 доби?

### 2 Даємо означення активності радіоактивного джерела

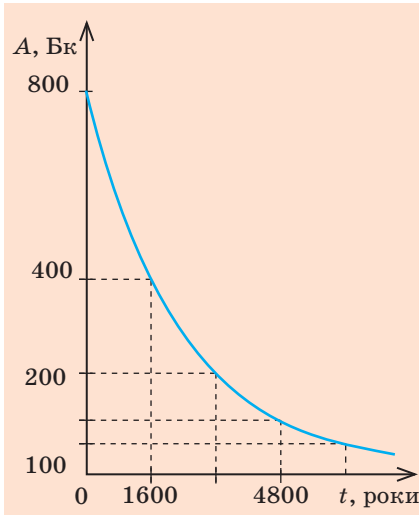
? І Уран-238, і Радій-226 є  $\alpha$ -радіоактивними (їхні ядра можуть спонтанно розпадатися на  $\alpha$ -частинку і відповідне дочірнє ядро). Якщо кількість атомів Урану-238 і Радію-226 є однаковою, з якого зразка за 1 с вилетить більше  $\alpha$ -частинок?

Сподіваємося, що ви правильно відповіли на подане запитання й, урахувавши, що періоди піврозпаду даних радіонуклідів відрізняються майже у 3 млн разів, визначили, що за той самий час у зразку радію відбудеться набагато більше  $\alpha$ -розпадів, ніж у зразку урану.

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіоактивному джерелі за одиницю часу, називають **активністю радіоактивного джерела**.

Період піврозпаду деяких радіонуклідів

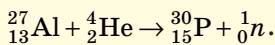
Радіонуклід	Період піврозпаду $T_{1/2}$
Йод-131	8 діб
Карбон-14	5700 років
Кобальт-60	5,3 року
Плутоній-239	24 тис. років
Радій-226	1600 років
Радон-220	56 с
Радон-222	3,8 доби
Уран-235	0,7 млрд років
Уран-238	4,5 млрд років
Цезій-137	30 років



**Рис. 24.1.** Графік залежності активності Радію-226 від часу. Період піврозпаду Радію-226 — 1600 років

### Історія відкриття штучних радіоактивних ізотопів

Перший штучний радіоактивний ізотоп ( $^{30}_{15}\text{P}$ ) був отриманий на початку 1934 р. подружжям *Фредеріком і Ірен Жоліо-Кюрі*. Опромінюючи  $\alpha$ -частинками алюміній, вони спостерігали випромінювання нейтронів, тобто відбувалася така ядерна реакція:



Італійський фізик *Енріко Фермі* уславив своє ім'я кількома видатними досягненнями. Однак свою найвищу нагороду — Нобелівську премію — учений одержав за відкриття штучної радіоактивності, спричиненої опромінюванням речовини повільними нейтронами. Зараз метод опромінювання нейтронами широко застосовують у промисловості для отримання радіоактивних ізотопів.

Активність радіоактивного джерела позначають символом  $A$ . *Одиниця активності в СІ — бекерель.*

**1 Бк** — це активність такого радіоактивного джерела, в якому за 1 с відбувається 1 акт розпаду:

$$[A] = 1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{розп}}{\text{с}} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

1 Бк — це дуже мала активність, тому використовують *позасистемну одиницю активності — кюрі (Ки):*

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

**?** На честь яких науковців названо значені одиниці? Які відкриття вони зробили?

Якщо зразок містить атоми лише одного радіонукліда, то активність цього зразка можна визначити за формулою:

$$A = \lambda N,$$

де  $N$  — кількість атомів радіонукліда в зразку на даний час;  $\lambda$  — стала радіоактивного розпаду радіонукліда (фізична величина, яка є характеристикою радіонукліда та пов'язана з періодом піврозпаду співвідношенням:  $\lambda = \frac{0,69}{T_{1/2}}$ ;  $[\lambda] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

Оскільки з плином часу в радіоактивному зразку кількість ядер радіонуклідів, що не розпалися, зменшується, то зменшується й активність зразка (рис. 24.1).

### 3 Дізнаємося про застосування радіоактивних ізотопів

Наявність у певному об'єкті радіонуклідів можна виявити за випромінюванням. Ви вже з'ясували, що активність випромінювання залежить від виду радіонукліда та його кількості, яка з часом зменшується. Все це покладено в основу використання радіоактивних ізотопів, які фізики навчилися отримувати штучно. Зараз для кожного хімічного елемента, що зустрічається в природі, отримано штучні радіоактивні ізотопи.



Можна визначити два напрями використання радіоактивних ізотопів.

1. *Використання радіоактивних ізотопів як індикаторів.* Радіоактивність є своєрідною міткою, за допомогою якої можна виявити наявність елемента, простежити за поведінкою елемента під час фізичних і біологічних процесів тощо (див., наприклад, [рис. 24.2](#)).

2. *Використання радіоактивних ізотопів як джерел  $\gamma$ -випромінювання* (див., наприклад, [рис. 24.3](#)).

Розглянемо кілька прикладів.

#### 4 Застосовуємо радіоактивні ізотопи для діагностики захворювань

Організм людини має властивість накопичувати у своїх тканинах певні хімічні речовини. Відомо, наприклад, що щитоподібна залоза накопичує йод, кісткова тканина — фосфор, кальцій і стронцій, печінка — деякі барвники тощо. Швидкість накопичування речовин залежить від стану здоров'я органа. Наприклад, відомо, що активність щитоподібної залози різко зростає у випадку базедової хвороби.

За кількістю йоду в щитоподібній залозі зручно стежити за допомогою його  $\gamma$ -радіоактивного ізотопу. Хімічні властивості радіоактивного і стабільного йоду не відрізняються, тому радіоактивний Йод-131 буде накопичуватися так само, як і його стабільний ізотоп.

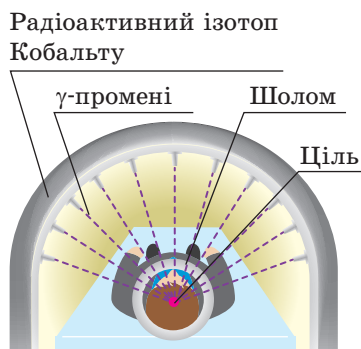
Якщо щитоподібна залоза в нормі, то через певний час після введення в організм Йоду-131  $\gamma$ -випромінювання від нього матиме певну оптимальну інтенсивність. А от якщо щитоподібна залоза функціонує з відхиленням від норми, то інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання буде аномально високою або, навпаки, низькою.

Аналогічний метод застосовують для досліджування обміну речовин в організмі, виявлення пухлин та ін.

Зрозуміло, що, використовуючи зазначені методи діагностики, необхідно ретельно дозувати кількість радіоактивного препарату, щоб внутрішнє опромінювання спричинило мінімальний негативний вплив на організм людини.



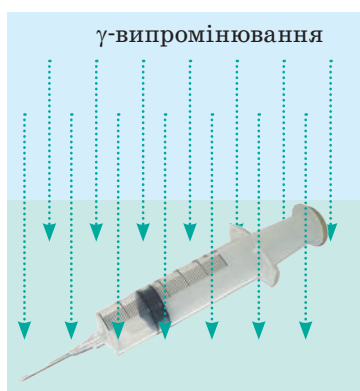
**Рис. 24.2.** Щоб з'ясувати, як рослини засвоюють фосфорні добрива, до цих добрив додають радіоактивний ізотоп Фосфору, а потім досліджують рослини на радіоактивність і виявляють кількість засвоєного фосфору



**Рис. 24.3.** Використання  $\gamma$ -випромінювання для лікування онкозахворювань. Щоб  $\gamma$ -промені не знищували здорові клітини, використовують декілька слабких пучків  $\gamma$ -променів, які фокусуються на пухлині



**Рис. 24.4.** Отриманий з молодого дерева 1 г вуглецю має активність 14–15 Бк (випромінює 14–15  $\beta$ -частинок за секунду). Через 5700 років після загибелі дерева кількість  $\beta$ -розпадів за секунду зменшується удвічі



**Рис. 24.5.** Найбільш поширену медичну продукцію: шприци, системи переливання крові тощо — перед відправленням споживачеві ретельно стерилізують із використанням  $\gamma$ -випромінювання

## 5 Визначаємо вік стародавніх предметів

В атмосфері Землі завжди є певна кількість  $\beta$ -радіоактивного Карбону  $^{14}_6\text{C}$ , який утворюється з Нітрогену внаслідок ядерної реакції з нейтронами. Цей ізотоп у складі вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) поглинається рослинами, а через них — тваринами. Поки тварина або рослина живі, вміст радіоактивного Карбону в них залишається незмінним. Після припинення життєдіяльності організму кількість радіоактивного Карбону починає зменшуватися, зменшується й активність  $\beta$ -випромінювання. Знаючи, що період піврозпаду Карбону  $^{14}_6\text{C}$  становить 5700 років, можна визначити вік археологічних знахідок (рис. 24.4).

## 6 Застосовуємо $\gamma$ -випромінювання в техніці

Особливе значення в техніці мають *гамма-дефектоскопи*, за допомогою яких перевіряють, наприклад, якість зварених з'єднань. Якщо майстер, приварюючи петлі до воріт, припустився браку, через деякий час петлі відвалляться. Це, звісно, неприємно, але ситуацію можна виправити. А от якщо брак стався у зварюванні елементів конструкції моста або ядерного реактора, трагедія неминуча. Завдяки тому що  $\gamma$ -промені по-різному поглинаються масивною сталлю і сталлю з порожнинами, гамма-дефектоскоп «бачить» тріщини всередині металу, а отже, виявляє брак ще на стадії виготовлення конструкції.

## 7 Знищуємо мікробів за допомогою радіації

Відомо, що певна доза опромінення вбиває організми. Але ж не всі вони корисні для людини. Так, медики невпинно працюють над тим, щоб позбутися хвороботворних мікробів. Згадайте: в лікарнях миють підлогу спеціальними розчинами, опромінюють приміщення ультрафіолетом, обробляють медичний інструмент і т. д. Такі процедури називають дезінфекцією та стерилізацією.

Поставити процес стерилізації на промислову основу дозволили особливості  $\gamma$ -випромінювання (рис. 24.5). Така стерилізація

здійснюється у спеціально створених установках із надійним захистом від проникаючої радіації. Як джерело  $\gamma$ -променів використовують штучно створені ізотопи Кобальту ( ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ) і Цезію ( ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ ).

### 8 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте масу Радію-226, якщо його активність становить 5 Кі. Стала радіоактивного розпаду Радію-226 дорівнює  $1,37 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ .

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі*

Для розв'язання задачі скористаємося формулою для визначення активності:  $A = \lambda N$ . Знаючи активність, визначимо кількість  $N$  атомів Радію. Масу речовини можна визначити, якщо кількість атомів помножити на масу одного атома:  $m = N \cdot m_0$ .

Із курсу хімії ви знаєте:

- 1 моль речовини містить  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  атомів;
- маса атома  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ , де  $M$  — молярна маса речовини (маса 1 моль).

*Дано:*

$$A = 5 \text{ Кі} = 5 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

$$\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$$

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

$$M = 226 \text{ г/моль} =$$

$$= 226 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

*Знайти:*

$m$  — ?

*Розв'язання*

$$m = N \cdot m_0, \text{ де } m_0 = \frac{M}{N_A}, \text{ отже, } m = N \cdot \frac{M}{N_A}.$$

$$\text{Оскільки } A = \lambda N, \text{ то } N = \frac{A}{\lambda}.$$

Підставимо вираз для  $N$  у вираз для маси:

$$m = \frac{A}{\lambda} \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{AM}{\lambda N_A}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[m] = \frac{\text{Бк} \cdot \text{кг/моль}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{1/моль}} = \frac{\text{с}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{моль}} = \text{кг}; \quad m = \frac{5 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 226 \cdot 10^{-3}}{1,37 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}.$$

**Відповідь:**  $m = 5,1 \text{ г}$ .



### Підбиваємо підсумки

Час, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер даного радіонукліда, називають періодом піврозпаду  $T_{1/2}$ . Період піврозпаду є характеристикою радіонукліда.

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіоактивному джерелі за одиницю часу, називають активністю радіоактивного джерела. Якщо джерело містить атоми тільки одного радіонукліда, активність  $A$  джерела можна визначити за формулою:  $A = \lambda N$ , де  $N$  — кількість атомів радіонукліда в зразку;  $\lambda$  — стала радіоактивного розпаду радіонукліда. Одиниця активності в СІ — бекерель (Бк).

Із часом активність радіонуклідів зменшується, і цю властивість застосовують для визначення віку археологічних знахідок. Штучно створені ізотопи використовують для стерилізації одноразових медичних виробів, діагностики та лікування захворювань, виявлення дефектів у металах та ін.

**Контрольні запитання**

1. Дайте означення періоду піврозпаду. Що характеризує ця фізична величина?
2. Що таке активність радіоактивного джерела?
3. Яка одиниця активності в СІ?
4. Як активність радіонукліда пов'язана зі сталою його розпаду?
5. Чи змінюється з часом активність радіонукліда? Якщо змінюється, то чому і як?
6. Наведіть приклади використання радіоактивних ізотопів.

**Вправа № 24**

1. Є однакова кількість ядер Йоду-131, Радону-220 і Урану-235. Який радіонуклід має найбільший період піврозпаду? Активність якого радіонукліда на даний момент часу є найбільшою? Обґрунтуйте свою відповідь.
2. У зразку міститься  $2 \cdot 10^{20}$  атомів Йоду-131. Визначте, скільки ядер Йоду розпадеться в зразку протягом години. Активність Йоду-31 протягом цього часу вважайте незмінною. Стала радіоактивного розпаду Йоду-131 дорівнює  $9,98 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ .
3. Період піврозпаду радіоактивного Карбону-14 становить 5700 років. У скільки разів зменшилася кількість атомів Карбону-14 у сосні, яку зрубали 17 100 років тому?
4. Визначте період піврозпаду радіонукліда, якщо за інтервал часу 1,2 с кількість ядер, що розпалися, складає 75 % їхньої початкової кількості.
5. На даний момент часу в радіоактивному зразку міститься 0,05 моль Радону-220. Визначте активність Радону-220 у цьому зразку.
6. На сьогодні одними з найбільш значущих є дослідження обміну речовин в організмі людини за допомогою радіоактивних ізотопів. Зокрема, виявлено, що за порівняно невеликий час організм майже повністю відновлюється. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про ці дослідження більше.

**Фізика і техніка в Україні**

**Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»** (ННЦ ХФТІ) — всесвітньо відомий науковий центр у галузі фізичних наук. Установу створено в 1928 р. за ініціативою академіка А. Ф. Йоффе як Український фізико-технічний інститут із метою досліджень у галузі ядерної фізики та фізики твердого тіла.

Уже в 1932 р. в інституті було отримано видатний результат — здійснено розщеплення ядра атома Літію. Пізніше в лабораторних умовах отримано рідкі водень і гелій, збудовано перший трикоординатний радіолокатор, проведено перші дослідження високовакуумної техніки, що дало поштовх розвитку нового фізико-технологічного напрямку — вакуумної металургії. У повоєнні часи вчені інституту відігравали вагомую роль у вирішенні проблем використання атомної енергії.

У різні роки в ННЦ ХФТІ працювали видатні фізики: І. В. Обреїмов, Л. Д. Ландау, І. В. Курчатов, К. Д. Синельников, Л. В. Шубников, О. І. Лейпунський, Є. М. Ліфшиць, І. М. Ліфшиць, А. К. Вальтер, Б. Г. Лазарев, Д. Д. Іваненко, А. І. Ахієзер, В. Є. Іванов, Я. Б. Файнберг, Д. В. Волков та ін. Наукові школи, створені в інституті, відомі в усьому світі.

У ННЦ ХФТІ розташований найпотужніший у СНД лінійний прискорювач електронів, а також сукупність термоядерних комплексів «Ураган».

Генеральний директор центру — відомий український фізик, академік НАНУ *Микола Федорович Шульга*.

## § 25. ЙОНІЗАЦІЙНА ДІЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. ПРИРОДНИЙ РАДІОАКТИВНИЙ ФОН. ДОЗИМЕТРИ

Радіоактивне випромінювання може бути небезпечним для організмів. Із цього параграфа ви дізнаєтеся, чому це так, за допомогою яких приладів можна виміряти рівень радіації, який рівень радіації є небезпечним, а за якого можна бути спокійними.

### 1 Дізнаємося про вплив іонізуючого випромінювання на організм

Радіоактивні  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -випромінювання чинять значний вплив на організми. Потрапляючи в речовину, радіоактивне випромінювання передає їй енергію. Через поглинання цієї енергії деякі атоми й молекули речовини йонізуються (рис. 25.1), унаслідок чого змінюється їхня хімічна активність, утворюються нові, надзвичайно активні хімічні сполуки.

Життєдіяльність будь-якого організму забезпечується хімічними реакціями, що відбуваються в його клітинах, тому потужне радіоактивне опромінення призводить до порушень функцій майже всіх органів: зростають крихкість і проникність судин, знижується опірність організму, відбувається розлад діяльності шлунково-кишкового тракту, порушуються функції кровотворних органів, нормальні клітини перероджуються на злоякісні.

### 2 Характеризуємо іонізуюче випромінювання

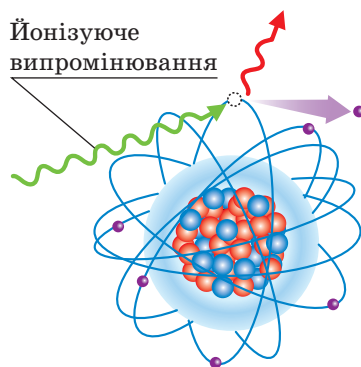
Зрозуміло, що чим більшою є поглинута речовиною енергія випромінювання, тим більший вплив цього випромінювання на речовину.

Відношення енергії  $W$  іонізуючого випромінювання, поглинутої речовиною, до маси  $m$  цієї речовини називають **поглинутою дозою іонізуючого випромінювання** ( $D$ ):

$$D = \frac{W}{m}$$

Одиниця поглинутої дози в СІ — **грей** (на честь англійського фізика *Л. Грея* (рис. 25.2)):

$$[D] = 1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$



**Рис. 25.1.** Унаслідок поглинання енергії іонізуючого випромінювання електрон вилітає з атома й атом перетворюється на позитивний йон



**Рис. 25.2.** Льюїс Гарольд Грей (1905–1965) — англійський фізик, працював над проблемами, пов'язаними із впливом опромінення на біологічні системи; засновник радіобіології

*Коефіцієнти якості деяких видів йонізуючого випромінювання*

Вид випромінювання	Коефіцієнт якості ( $K$ )
$\alpha$ -випромінювання	20
$\beta$ -випромінювання	1
$\gamma$ -випромінювання	1
Нейтрони	5–10
Протони	5



**Рис. 25.3.** Рольф-Максиміліан Зіверт (1896–1966) — шведський учений. Працював у галузі медичної фізики, вивчав вплив радіації на біологічні системи



**Рис. 25.4.** Змії дуже стійкі до радіації. Деякі з них можуть витримати радіоактивне випромінювання до 150 Гр

Біологічний вплив різних видів випромінювання на організми є неоднаковим за однакової поглинутої дози. Наприклад, за однакової енергії  $\alpha$ -випромінювання значно небезпечніше, ніж  $\beta$ - або  $\gamma$ -випромінювання.

Фізичну величину, яка характеризує біологічний вплив поглинутої дози йонізуючого випромінювання, називають **еквівалентною дозою йонізуючого випромінювання ( $H$ )**:

$$H = K \cdot D,$$

де  $D$  — поглинута доза;  $K$  — коефіцієнт якості, який характеризує небезпечність даного виду випромінювання: чим більший коефіцієнт якості, тим небезпечнішим є випромінювання (див. таблицю).

Одиниця еквівалентної дози в СІ — **зиверт** (на честь шведського вченого *Р. Зіверта* (рис. 25.3)):

$$[H] = 1 \text{ Зв.}$$

### 3 Виявляємо особливості впливу радіації

Ушкодження організмів, зумовлені впливом радіації, мають низку особливостей.

По-перше, найбільш чутливими до радіації є ті клітини, що швидко діляться. Так, першим відчуває дію радіоактивного випромінювання кістковий мозок, унаслідок чого порушується процес кровотворення.

По-друге, різні типи організмів мають різну чутливість до радіоактивного випромінювання (рис. 25.4). Найстійкішими до радіації є одноклітинні.

По-третє, наслідки впливу однакової поглинутої дози випромінювання залежать від віку організму.

Зазначимо, що окрім зовнішнього опромінення існує небезпека й внутрішнього опромінення, адже радіонукліди можуть потрапити в організм, наприклад, із їжею або водою. Підвищена небезпека внутрішнього опромінення зумовлена кількома причинами.

По-перше, деякі радіонукліди здатні вибірково накопичуватися в окремих органах. Наприклад, 30 % йоду накопичується в щитоподібній залозі, маса якої становить лише

0,03 % маси тіла людини. Радіоактивний йод, таким чином, усю свою енергію віддає невеликому об'єму тканини.

По-друге, внутрішнє опромінення є тривалим: радіонуклід, який потрапив в організм, не відразу виводиться з нього, а зазнає низки радіоактивних перетворень усередині організму. При цьому виникає радіоактивне випромінювання, яке йонізує молекули й цим змінює їхню біохімічну активність.

#### 4 Дізнаємося про радіаційний фон

Усі люди на Землі зазнають впливу радіації, адже в будь-якій місцевості завжди є певний *радіаційний фон* (рис. 25.5).

Радіаційний фон Землі складається з кількох компонентів: космічне випромінювання; випромінювання природних радіонуклідів, які містяться в земній корі, повітрі та інших об'єктах зовнішнього середовища; випромінювання штучних радіоактивних ізотопів.

Випромінювання природних радіонуклідів і космічне випромінювання створюють **природний радіаційний фон**.

У результаті діяльності людини радіаційний фон Землі значно змінився — відбулося *техногенне підвищення радіаційного фону*. Приклад такої діяльності людини — видобування корисних копалин, які містять підвищену кількість радіонуклідів. Так, підвищений уміст природних радіоактивних ізотопів є в граніті. А далі будують ланцюжок. Гранітний щебінь



**Рис. 25.5.** Середні еквівалентні дози йонізуючого випромінювання, які отримує людина протягом року від деяких джерел радіації

є складником бетону, з якого споруджують будинки. Отже, підвищений радіаційний фон слід шукати насамперед усередині будинків із бетону, особливо в закритих приміщеннях, які не провітрюються (концентрація радону в закритих приміщеннях у середньому у вісім разів вища, ніж іззовні).

- ?** Проаналізуйте рис. 25.5. Від яких джерел людина отримує найбільшу дозу радіації? Чи значним є вплив радіації, пов'язаної з розвитком атомної енергетики?

## 5 Знайомимося з дозиметром

Життя на Землі виникло та розвивається в умовах безперервної дії радіації. Тому природний радіаційний фон суттєво не впливає на життя та здоров'я людей. Сучасні радіобіологічні дослідження показують, що за тих доз, які відповідають радіаційному фону 1–2 мЗв на рік, дія радіації є безпечною для людини.

Але навіть невелике перевищення допустимого рівня радіації може спричинити генетичні дефекти, які, можливо, виявляться в дітей або онуків людини, що була опромінена. Великі дози радіації спричиняють серйозні ураження тканин. Наприклад, отримана протягом кількох годин еквівалентна доза йонізуючого опромінення 1 Зв викликає небезпечні зміни в крові, а у 50 % випадків доза 3–5 Зв спричиняє загибель. Тому працівники, які мають справу з радіацією або певний час перебувають на радіаційно забрудненій території, обов'язково користуються *дозиметрами*.

**Дозиметр** — прилад для вимірювання дози йонізуючого випромінювання, отриманого приладом (і тим, хто ним користується) за деякий інтервал часу, наприклад за період перебування на деякій території або протягом робочої зміни.

Прилади для вимірювання інтенсивності радіоактивного випромінювання від певного джерела (рідини, газу, забрудненої поверхні) називають **радіометрами** (або *дозиметрами другого типу*) (рис. 25.6, а).

У людському організмі міститься близько  $3 \cdot 10^{-3}$  г радіоактивного калію та  $6 \cdot 10^{-9}$  г радію. Унаслідок цього в тілі людини щосекунди відбувається 6000  $\beta$ -розпадів і 220  $\alpha$ -розпадів.

Ще 2500  $\beta$ -розпадів за секунду відбувається завдяки радіоактивному вуглецю.

Загалом у тілі людини щосекунди відбувається 10 000 актів розпаду.

Основною складовою будь-якого дозиметра є *детектор* — пристрій, що слугує для реєстрації йонізуючого випромінювання (див. рис. 25.6, б). У разі потрапляння йонізуючого випромінювання на детектор виникають електричні сигнали (імпульси струму або напруги), які зчитує *вимірювальний пристрій*. Дані про дозу йонізуючого випромінювання подаються на *вихідний пристрій* (виводяться на дисплей дозиметра); інформація про підвищення радіації може подаватися світінням, звуковим сигналом тощо.



### Підбиваємо підсумки

Потрапляючи в речовину, радіоактивне випромінювання передає їй енергію. У результаті деякі атоми та молекули



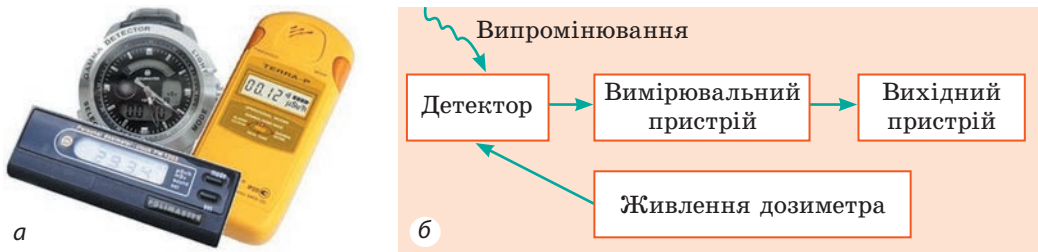


Рис. 25.6. Побутові дозиметри (радіометри): а — вигляд; б — типова блок-схема

речовини йонізуються, змінюється їхня хімічна активність. Оскільки життєдіяльність організмів базується на хімічних реакціях, то радіоактивне випромінювання чинить біологічну дію.

Відношення енергії  $W$  йонізуючого випромінювання, поглинутої речовиною, до маси  $m$  цієї речовини називають поглинутою дозою йонізуючого випромінювання  $D$ :  $D=W/m$ .

Біологічний вплив йонізуючого випромінювання залежить як від поглинутої дози, так і від особливостей самого випромінювання; характеристикою біологічного впливу є еквівалентна доза йонізуючого випромінювання:  $H=KD$ , де  $K$  — коефіцієнт якості.

Одиниця поглинутої дози йонізуючого випромінювання в СІ — грей (Гр), одиниця еквівалентної дози — зиверт (Зв). Для вимірювання доз йонізуючого випромінювання використовують дозиметри.

На поверхні Землі реєструється певний рівень радіації — радіаційний фон, який складається з космічного випромінювання, випромінювання природних радіонуклідів і штучних радіоактивних ізотопів.

### Контрольні запитання



1. У чому виявляється біологічна дія радіації на організми? 2. Дайте означення поглинутої дози йонізуючого випромінювання. Якою є її одиниця в СІ? 3. Як обчислюють еквівалентну дозу йонізуючого випромінювання? Якою є її одиниця в СІ? 4. Якими є особливості впливу радіації? Чим зумовлена підвищена небезпека радіонуклідів, що потрапили в організм? 5. Назвіть причини, через які ви завжди і незалежно від того, де живете, зазнаєте впливу радіації. 6. Що таке радіаційний фон? Із яких компонентів він складається? 7. Назвіть джерела радіаційного фону Землі. 8. Для чого призначені дозиметри? Яким є принцип їхньої дії?



### Вправа № 25

1. Ви перебуваєте поблизу джерела  $\alpha$ -випромінювання. Як ви можете захистити себе від шкідливого впливу радіації?
2. У результаті зовнішнього опромінення співробітник лабораторії щосекунди отримує поглинуту дозу йонізуючого випромінювання, що дорівнює  $2 \cdot 10^{-9}$  Гр. Яку поглинуту дозу отримає співробітник протягом години?
3. У результаті внутрішнього опромінення кожен грам живої тканини поглинув  $10^8$   $\alpha$ -частинок. Визначте еквівалентну дозу йонізуючого випромінювання, якщо енергія кожної  $\alpha$ -частинки дорівнює  $8,3 \cdot 10^{-13}$  Дж.

4. Яку еквівалентну дозу йонізуючого випромінювання отримає особа, що перебуває поблизу джерела  $\gamma$ -випромінювання протягом 1 год, якщо щосекунди вона отримує поглинуту дозу  $25 \cdot 10^{-9}$  Гр?
5. Існує гіпотеза, що людство виникло завдяки мутаціям, які відбулися в мавп унаслідок дії радіоактивного випромінювання. Skorиставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про цю гіпотезу більше. Чи можна з нею погодитися? Обґрунтуйте свою думку.



### Експериментальне завдання

Якщо у вас є можливість скористатися дозиметром, виміряйте радіаційний фон у різних точках своєї квартири, поблизу гранітної бруківки, в бетонному, цегляному та дерев'яному будинках, у підвалі будинку, на верхньому поверсі. Поясніть результати своїх досліджень.



## § 26. ЛАНЦЮГОВА ЯДЕРНА РЕАКЦІЯ. ЯДЕРНИЙ РЕАКТОР

«...Попередні епохи отримали назву від певних матеріалів: була доба кам'яна, бронзова, залізна. Але жодної з них не було б, якби людина не знала вогню. Справжнє багатство світу — його енергія», — писав англійський радіохімік, лауреат Нобелівської премії *Фредерік Содді* (1877–1956) у своїй книзі «Матерія та енергія». ХХ ст. можна сміливо назвати атомним, адже саме в цьому столітті людина відкрила й почала приборкувати енергію атомного ядра. Про те, як допомагають дослідження з ядерної фізики забезпечувати людство енергією, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

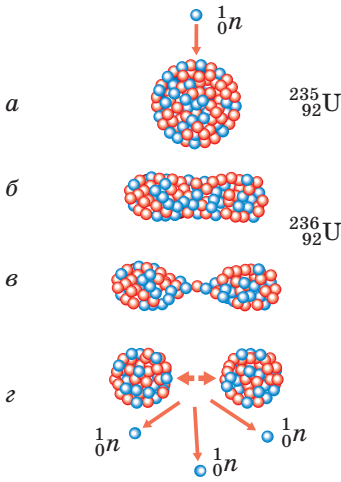
### 1 Дізнаємося про поділ важких ядер і ланцюгову ядерну реакцію

Наприкінці 1938 р. німецькі радіохіміки *Отто Ган* (1879–1968) і *Фріц Штрасман* (1902–1980) проводили досліди з опроміненням урану нейтронами. На превеликий подив учених, у ході дослідів було виявлено барій та деякі інші елементи середньої частини Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва.

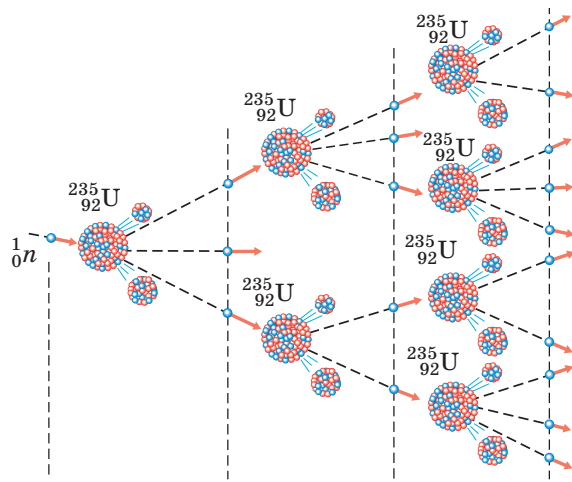
Пояснюючи несподівані для вчених того часу результати дослідів, австралійський радіохімік *Ліза Мейтнер* (1878–1968) і англійський фізик *Отто Фріш* (1904–1979) дійшли висновку, що ядро Урану (важке ядро), поглинаючи нейтрон, «лускає» — розпадається на більш легкі ядра.

Так було відкрито **розщеплення ядра** — *поділ важкого атомного ядра на два (рідше три) ядра, які називають осколками поділу\** (рис. 26.1).

\* У 1945 р. за відкриття розщеплення важких атомних ядер О. Ган отримав Нобелівську премію з хімії.



**Рис. 26.1.** Схема поділу ядра Урану. Поглинаючи нейтрон (а), ядро Урану збуджується й набуває видовженої форми (б); поступово розтягуючись (в), нове нестійке ядро розпадається на два осколки (г)



**Рис. 26.2.** Схематичне зображення ланцюгової ядерної реакції: під час одного акту поділу ядра Урану вивільняється 2 або 3 нейтрони, завдяки яким і розвивається ланцюгова ядерна реакція

**?** Розгляньте [рис. 26.1](#) і поясніть, чому осколки розлітаються з величезною швидкістю. *Підказка:* ядерні сили (сили притягання, які утримують нуклони всередині ядра) є короткодійними, а от електростатичні (кулонівські) сили — далекодійними.

Якщо ви уважно розглянули схему на [рис. 26.1](#), то, мабуть, звернули увагу на те, що під час розщеплення ядра Урану крім осколків поділу вивільняються нейтрони. Ці нейтрони можуть спричинити поділ інших ядер Урану, які в свою чергу також випустять нейтрони, що здатні викликати поділ наступних ядер, і т. д. Кількість ядер, що розщеплюються, буде швидко зростати — в урановому зразку відбуватиметься **ланцюгова ядерна реакція поділу** ([рис. 26.2](#)).

Дуже важливим є той факт, що ланцюгова ядерна реакція супроводжується *виділенням величезної кількості енергії*. Під час поділу одного ядра Урану виділяється лише  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж енергії, проте якщо розпадуться всі ядра, що містяться, наприклад, в одному молі урану (235 г Урану;  $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер), енергія, яка виділиться, дорівнюватиме приблизно  $19,2 \cdot 10^{12}$  Дж. Стільки ж енергії виділиться, якщо спалити, наприклад, 450 т нафти.

## 2 Знайомимося з будовою ядерного реактора

Ланцюгова реакція поділу, яка відбувається в урані та деяких інших речовинах, є основою для перетворення ядерної енергії на теплову й електричну. Згадайте: під час ланцюгової реакції безупинно з'являються нові й нові осколки поділу, які рухаються з великою швидкістю. Якщо урановий стрижень занурити в холодну воду, то осколки зіштовхуватимуться

з молекулами води й віддаватимуть їм свою енергію. У результаті холодна вода нагріється або навіть перетвориться на пару. Саме так працює *ядерний реактор*, у якому ядерна енергія перетворюється на теплову.

**Ядерний реактор** — пристрій, призначений для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу, яка завжди супроводжується виділенням енергії.

У ядерних реакторах (рис. 26.3) ядерне паливо (уран або плутоній) розміщують усередині так званих *тепловидільних елементів* (ТВЕЛів). Продукти поділу нагрівають оболонки ТВЕЛів, і ті передають енергію воді, яка в даному випадку є теплоносієм. Отримана енергія перетворюється далі на електричну (рис. 26.4) подібно до того, як це відбувається на звичайних теплових електростанціях.

Щоб керувати ланцюговою ядерною реакцією та унеможливити ймовірність вибуху, використовують *регулюючі стрижні*, виготовлені з матеріалу, що добре поглинає нейтрони. Так, якщо температура в реакторі збільшується, стрижні автоматично заглиблюються в проміжки між ТВЕЛами, в результаті кількість нейтронів, що вступають у реакцію, зменшується і ланцюгова реакція сповільнюється.

### 3 Дізнаємося про термоядерну реакцію

Ми з'ясували, що внаслідок поділу важких ядер утворюються елементи середньої частини Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва і виділяється енергія (рис. 26.5, а). Цю енергію називають ядерною, адже вона «схована» в ядрі атома. Зрозуміло, якби нам спало на думку знову з'єднати осколки поділу, то необхідно було б витратити таку саму енергію.

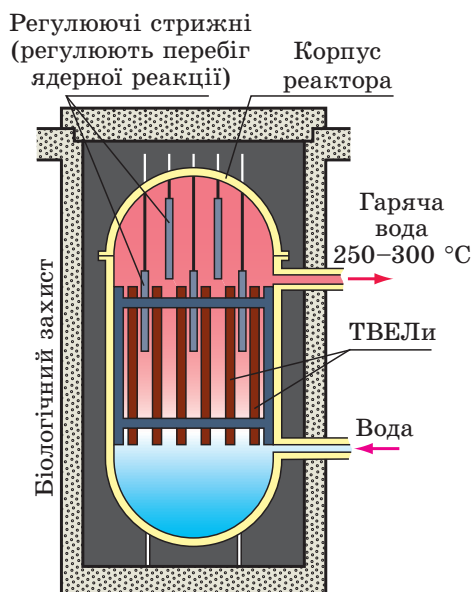


Рис. 26.3. Схема будови ядерного реактора

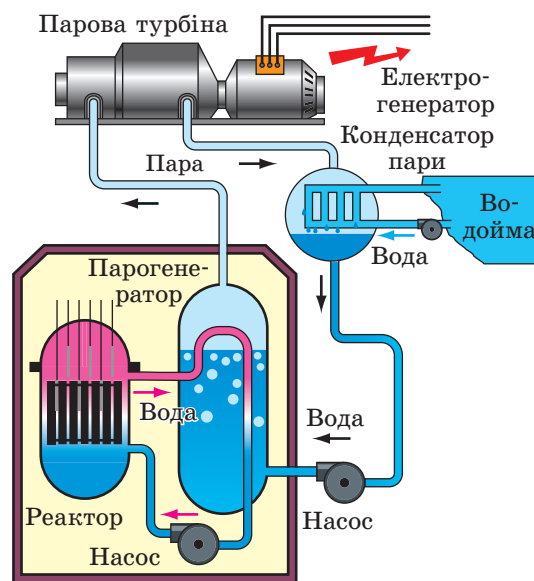


Рис. 26.4. Принцип роботи атомної електростанції

**?** Згадайте, на якому фундаментальному законі фізики ґрунтується останнє твердження.

А от якщо взяти ядра ізоотопів легких елементів, наприклад ядро Дейтерію і ядро Тритію, то внаслідок їх з'єднання енергія буде виділятися\* (рис. 26.5, б).

Реакцію злиття легких ядер у більш важкі, яка відбувається за дуже високих температур (понад  $10^7$  °C) і супроводжується виділенням енергії, називають **термоядерним синтезом**.

Високі температури, тобто великі кінетичні енергії ядер, потрібні для того, щоб подолати сили електричного відштовхування ядер (однойменно заряджених частинок). Без цього неможливо зблизити легкі ядра на такі відстані, на яких починають діяти ядерні сили притягання.

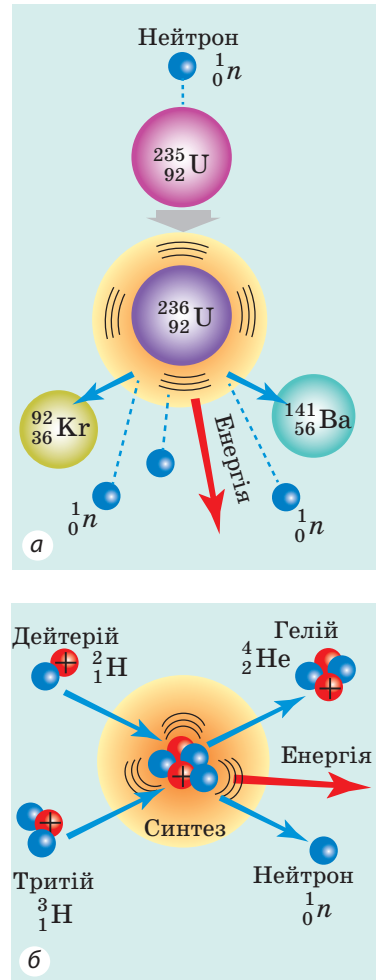
У природі термоядерні реакції відбуваються в надрах зір, де ізотопи Гідрогену перетворюються на Гелій (див. рис. 26.5, б). Так, за рахунок термоядерних реакцій, що відбуваються в надрах Сонця, воно щосекунди випромінює в космічний простір  $3,8 \cdot 10^{26}$  Дж енергії. Це колосальна енергія — щоб стільки її отримати, потрібно спалити в тисячу разів більше вугілля, ніж мають усі відомі запаси на Землі.

Термоядерні реакції — це майже невичерпне джерело енергії. Фізики вже навчилися створювати умови для виникнення таких реакцій, а от їх використання в промисловому масштабі поки що залишається на рівні експериментів.

#### 4 Учимися розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте масу Урану-235, яку витрачає за добу реактор атомної електростанції, якщо вихідна електрична потужність відповідного блока електростанції становить 1000 МВт, а його ККД — 30 %. Маса одного ядра Урану-235 дорівнює  $3,9 \cdot 10^{-25}$  кг, а під час кожного поділу виділяється  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж енергії.

\* Ця властивість пояснюється різною питомою енергією зв'язку атомних ядер, про яку ви дізнаєтесь, вивчаючи фізику в старшій школі.



**Рис. 26.5.** І розпад важких ядер (а), і синтез легких ядер (б) супроводжуються виділенням енергії

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі*

Для розв'язання задачі скористаємось означенням ККД:  $\eta = \frac{E_{\text{кор}}}{E_{\text{повна}}}$ .

Тут  $E_{\text{кор}}$  — електрична енергія, яку виробляє блок атомної електростанції за добу:  $E_{\text{кор}} = P_{\text{кор}} \cdot t$  (час  $t$  подано в секундах);  $E_{\text{повна}}$  — повна енергія, що виділяється в реакторі:  $E_{\text{повна}} = E_0 \cdot N$ , де  $E_0$  — енергія, яка виділяється під час розпаду одного ядра,  $N$  — кількість ядер, які розпалися.

Кількість ядер в урановому паливі подамо через масу палива ( $m$ ) і масу одного ядра ( $m_0$ ):  $N = \frac{m}{m_0}$ .

**Дано:**

$$t = 1 \text{ доба} = 1 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}$$

$$P_{\text{кор}} = 1000 \text{ МВт} =$$

$$= 1 \cdot 10^9 \text{ Вт}$$

$$\eta = 30 \% = 0,3$$

$$m_0 = 3,9 \cdot 10^{-11} \text{ кг}$$

$$E_0 = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

**Знайти:**

$m$  — ?

**Розв'язання**

За означенням ККД:  $\eta = \frac{E_{\text{кор}}}{E_{\text{повна}}}$ , де

$$E_{\text{кор}} = P_{\text{кор}} \cdot t; \quad E_{\text{повна}} = E_0 \cdot N = \frac{E_0 \cdot m}{m_0}$$

Підставимо вирази для визначення  $E_{\text{кор}}$  і  $E_{\text{повна}}$  у формулу ККД. Маємо:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}} \cdot t \cdot m_0}{E_0 \cdot m}$$

Із останньої формули знайдемо масу ядерного палива:  $m = \frac{P_{\text{кор}} \cdot t \cdot m_0}{E_0 \cdot \eta}$ .

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[m] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж}/\text{с} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$$

$$m = \frac{1 \cdot 10^9 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 3,9 \cdot 10^{-25}}{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 0,3} = \frac{10^9 \cdot 24 \cdot 36 \cdot 10^2 \cdot 39 \cdot 10^{-25}}{32 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 3,5 \text{ (кг)}.$$

**Відповідь:**  $m = 3,5$  кг.

Виходить, що навіть один блок атомної електростанції виробляє енергії більше, ніж споживає велике місто. Дійсно, за добу один блок атомної електростанції виробляє:  $E_{\text{кор}} = P_{\text{кор}} \cdot t = 1000 \text{ МВт} \cdot 24 \text{ год} = 24 \text{ 000 МВт} \cdot \text{год}$  енергії, а, наприклад, Київ у літні місяці споживає за добу лише  $300 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ .

**Підбиваємо підсумки**

Поглинення нейтрона ядром Урану може спричинити розпад ядра. Ця реакція супроводжується звільненням нейтронів, які містяться в ядрі, а ті, у свою чергу, можуть спричинити поділ інших ядер Урану — відбуватиметься ланцюгова ядерна реакція, яка супроводжується виділенням величезної енергії. Процес перетворення ядерної енергії на теплову здійснюється в ядерних реакторах — пристроях, призначених для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу.

Виділенням енергії супроводжується і процес синтезу деяких легких ядер. Така реакція отримала назву термоядерної, оскільки для її початку необхідна дуже висока температура. Термоядерні реакції синтезу відбуваються в надрах зір. Зараз вчені працюють над створенням термоядерних реакторів — пристроїв, призначених для отримання енергії за рахунок реакції термоядерного синтезу легких ядер, яка відбувається в плазмі за дуже високих температур (понад  $10^7$  °С).

### Контрольні запитання



1. Які процеси відбуваються внаслідок поглинання нейтрона ядром Урану?
2. Опишіть механізм ланцюгової ядерної реакції.
3. Які перетворення енергії відбуваються в ядерних реакторах?
4. Як працює атомна електростанція?
5. Який процес називають термоядерним синтезом?
6. Звідки «беруть» енергію зорі?



### Вправа № 26

1. У ясний сонячний день на кожний  $1 \text{ м}^2$  відкритої горизонтальної поверхні щосекунди потрапляє 650 Дж сонячної енергії. Скільки сонячної енергії за годину потрапляє на дах будівлі, якщо площа даху дорівнює  $100 \text{ м}^2$ ? Скільки (в кілограмах) сухих дров необхідно спалити, щоб отримати ту саму кількість енергії, що потрапляє на дах будівлі від Сонця (питома теплота згорання сухих дров —  $10 \text{ МДж/кг}$ )? Поміркуйте, де вам можуть знадобитися подібні розрахунки.
2. Яку кількість енергії можна отримати від ділення  $1 \text{ г}$  Урану-235, якщо в ході поділу кожного ядра виділяється енергія, що дорівнює  $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ ?
3. Потужність реактора атомного криголама —  $80\,000 \text{ кВт}$ . Споживання реактором Урану-235 становить  $500 \text{ г}$  на добу. Визначте ККД реактора.
4. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, коли була здійснена перша керована ланцюгова ядерна реакція; коли і де було створено перший промисловий ядерний реактор; чи існують на нашій планеті місця, де відбувалася природна ланцюгова ядерна реакція.

### Фізика і техніка в Україні

**Інститут ядерних досліджень НАНУ** (Київ) — провідна наукова установа в галузі ядерної фізики та атомної енергетики. Інститут був створений у 1970 р. на базі ядерних відділів Інституту фізики АН УРСР.

Засновником і першим директором інституту був академік НАНУ *М. В. Пасічник*. Згодом установу очолювали академік НАНУ *О. Ф. Німець*, академік НАНУ *І. М. Вишневський*, із 2015 р. директором інституту є член-кореспондент НАНУ *Василь Іванович Слісенко*.

Основні напрями роботи інституту — фундаментальні та прикладні дослідження з ядерної фізики низьких і середніх енергій, фізики реакторів, теорії ядра, ядерної спектроскопії, ядерної електроніки, радіаційної фізики, термоядерного синтезу, фізики плазми, а також взаємодії нейтронів, протонів, дейтронів, альфа-частинок та важких ядер із ядрами майже всіх елементів Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва.

Під керівництвом провідних учених в інституті склалися відомі наукові школи: з нейтронної фізики, фізики ядерних реакцій із зарядженими частинками, мікроскопічної теорії ядра, ядерної спектроскопії, неприскорювальної фізики елементарних частинок.

Науковці інституту відіграли визначну роль в усуненні наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.

## § 27. АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Велика перевага ядерного палива перед традиційним (газ, нафта, вугілля) полягає в тому, що енергетична ефективність ядерного палива вища в мільйони разів (у 2 млн разів вища за нафту, у 3 млн разів — за вугілля). До того ж запаси ядерного палива в десятки разів більші, ніж вуглеводневих видів палива, а його спалювання не потребує кисню. Однак використання ядерного палива пов'язане з певними труднощами.



**Рис. 27.1.** ТВЕЛ (тепловидільний елемент) — частина реактора, пристрій, у якому міститься ядерне паливо (таблетки діоксиду Урану)

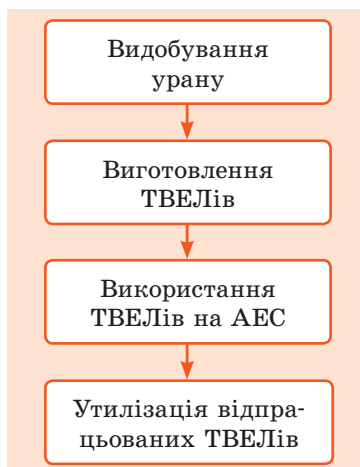
### 1 Дізнаємося про ядерний цикл

Щоб отримати кілограм палива з низькою енергетичною ефективністю, наприклад кілограм дров, досить сходити до лісу. А от щоб отримати кілограм ядерного палива, слід створити цілу промисловість. Крім того, після згоряння кілограма дров попіл можна просто розкидати. А що робити з ТВЕЛами (рис. 27.1), які відпрацювали свій ресурс? Адже саме у ТВЕЛах відбувається ланцюгова ядерна реакція і тому вони містять величезну кількість радіоактивних осколків із довгим періодом піврозпаду.

Послідовність операцій з видобування ядерного палива з руди, виготовлення ТВЕЛів, використання ТВЕЛів на атомних електростанціях і подальшого перероблення радіоактивних відходів називають **ядерним циклом** (рис. 27.2).

За запасами уранової руди Україна посідає 11 місце у світі. Цих запасів вистачить на кілька століть. Але щоб переробити руду на ядерне паливо, виготовити ТВЕЛи, необхідна спеціалізована промисловість (ланцюжок взаємопов'язаних виробництв), якої Україна в повному обсязі не має. Для українських атомних електростанцій ТВЕЛи виготовляють за кордоном.

Після того як у ТВЕЛі розпадається певна частина ядерного палива (фізики кажуть: «ТВЕЛ вигорів»), його замінюють новим. ТВЕЛи, які відпрацювали свій ресурс, дуже радіоактивні, тому їх у спеціальних контейнерах розташовують глибоко під землею, там вони мають зберігатися протягом сотень років.



**Рис. 27.2.** Схема ядерного циклу



На сьогодні в Україні тільки Запорізька атомна електростанція (рис. 27.3) має власне сховище для відпрацьованих ТВЕЛів. ТВЕЛІ з інших атомних електростанцій вивозять до Росії, за що наша країна сплачує великі кошти. Існують наміри побудувати сховище для відпрацьованих ТВЕЛів у Чорнобильській 30-кілометровій зоні, адже ця територія ще довго не буде придатною для життя людей. Крім того, місця для сховища можна буде надавати й іншим країнам.

**?** Поміркуйте над аргументами «за» будівництво такого сховища і «проти».

## 2 Дізнаємося про атомну енергетику України

Україна належить до тих країн світу, в яких завдяки наявності високих технологій, висококваліфікованих інженерів і вчених створена й успішно розвивається атомна енергетика. На сьогодні в країні працюють чотири атомні електростанції: Запорізька, Рівненська, Южно-Українська, Хмельницька (рис. 27.3–27.6). На цих АЕС діють 15 атомних енергоблоків, загальна потужність яких становить 13 580 МВт. На атомні електростанції припадає близько половини електроенергії, що виробляється в країні.

АЕС обслуговуються багатотисячними колективами висококваліфікованих фахівців. Фактично навколо кожної з українських АЕС виросло невелике місто.

Наявність в Україні джерел електроенергії, які працюють на ядерному паливі, безперечно пом'якшує дедалі більший дефіцит «звичних» енергоносіїв: газу, нафти, кам'яного вугілля.

Коли йдеться про АЕС, побоювання пересічного громадянина зазвичай пов'язані зі словом «радіація». Але, як показують дослідження, найбільший вплив радіації на людину відбувається за рахунок природних джерел радіації, під час медичних досліджень і лікування. Радіація, пов'язана з «нормальним» розвитком атомної енергетики, становить лише малу частину радіації, що спричинена



**Рис. 27.3.** Запорізька АЕС — найбільша атомна електростанція Європи, на ній працює 6 атомних енергоблоків



**Рис. 27.4.** Рівненська АЕС має 4 атомні енергоблоки



**Рис. 27.5.** Южно-Українська АЕС має 3 атомні енергоблоки



**Рис. 27.6.** Хмельницька АЕС має 2 атомні енергоблоки

діяльністю людини. Проте, на жаль, історія людства налічує декілька випадків аномального розвитку подій на ядерних реакторах. Наслідки цих випадків були катастрофічними.

### 3 Згадуємо історію Чорнобильської трагедії

26 квітня 1986 р. позначене чорними барвами в історії України. Саме того дня стався вибух на 4-му енергоблоці Чорнобильської атомної електростанції (рис. 27.7). Керівництво станції дало згоду на випробування роботи ядерного реактора в режимі змінної потужності, що не було передбачено конструкцією реактора. У результаті відбулося неконтрольоване виділення ядерної енергії всередині реактора і стався вибух.

Вибух призвів до пожежі на 4-му енергоблоці й до катастрофічного викиду радіоактивних речовин. Корпус реактора почав працювати як величезна піч, виносячи радіоактивний дим в атмосферу. Вітер розніс цей дим на багато сотень і тисяч кілометрів (підвищення рівня радіації було зафіксовано навіть у Швеції). У ліквідації аварії на ЧАЕС брали участь фахівці всіх республік Радянського Союзу.

Особливу роль у зменшенні масштабів трагедії відіграли пожежники. Ціною свого життя вони запобігли поширенню пожежі на інші реактори Чорнобильської АЕС.

Із катастрофою таких масштабів людство раніше не стикалося, тому пожежу не вдалося зупинити швидко. У результаті цілі регіони Росії, України, Білорусі виявилися радіаційно забрудненими, а з 30-кілометрової зони навколо станції було евакуйоване все населення.

Пізніше над зруйнованим реактором був побудований так званий *саркофаг* — бетонна конструкція, яка захищає від подальшого поширення радіаційного забруднення (рис. 27.8).

Сьогодні всі енергоблоки Чорнобильської АЕС виведено з експлуатації; разом із міжнародними організаціями Україна побудувала ще один саркофаг, досконаліший. Після трагедії минуло понад 30 років, проте наслідки радіаційного забруднення, особливо в зоні Чорнобильської АЕС, відчутні й досі.



**Рис. 27.7.** Четвертий енергоблок Чорнобильської атомної електростанції до вибуху (а) і після вибуху (б)



**Рис. 27.8.**  
Саркофаг над  
4-м енергоблоком  
Чорнобильської  
АЕС

Подібна за масштабами катастрофа відбулася в Японії у 2011 р. — на атомній електростанції «Фукусіма-1». Унаслідок землетрусу та цунамі припинили дію насоси, що перекачують теплоносії. Відбулися перегрів і пошкодження атомного реактора, і радіаційна речовина забруднила довкілля.

Тож зараз людство опинилося перед дилемою: поступове вичерпання традиційних енергоносіїв нібито підштовхує до розвитку атомної енергетики, разом із тим від жахливих аварій не застраховані навіть такі технологічно розвинені країни, як Японія. Уряд Німеччини зробив свій вибір і заборонив розвиток атомної енергетики.

**?** А яка ваша думка щодо цього питання? Поміркуйте над аргументами «за» і «проти».



### Підбиваємо підсумки

Послідовність операцій видобування ядерного палива з руди, виготовлення ТВЕЛів, використання ТВЕЛів на атомних електростанціях і подальшого перероблення радіоактивних відходів називають ядерним циклом.

Зараз в Україні працюють чотири атомні електростанції загальною потужністю 13 580 МВт. На АЕС припадає майже половина електроенергії, що виробляється в країні. Якщо атомна електростанція працює «нормально» (відпрацьовані ТВЕЛи надійно зберігаються у сховищах, не відбувається збоїв у роботі реактора, виконано всі заходи, передбачені нормативними документами), то вона майже не чинить радіаційного впливу на довкілля.

26 квітня 1986 р. сталася Чорнобильська катастрофа — вибух на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС. Вибух спричинив найбільше у світі радіаційне зараження місцевості, зокрема великих територій у Росії, Україні та Білорусі. Наслідки цього зараження відчутні дотепер. Подібна за масштабами катастрофа відбулася на атомній електростанції «Фукусіма-1» в Японії у 2011 р.

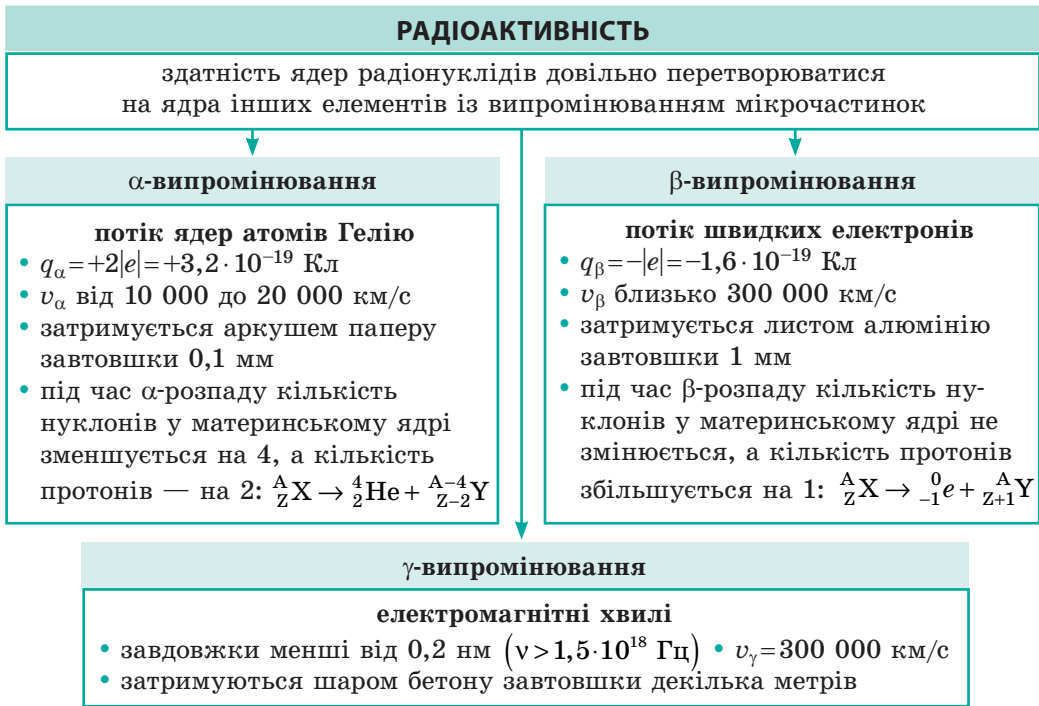


### Контрольні запитання

**1.** Перелічіть переваги й недоліки використання ядерного палива. **2.** Якою є послідовність операцій ядерного циклу? **3.** Назвіть атомні електростанції України. Якою є їхня загальна потужність? **4.** Що ви знаєте про Чорнобильську трагедію?



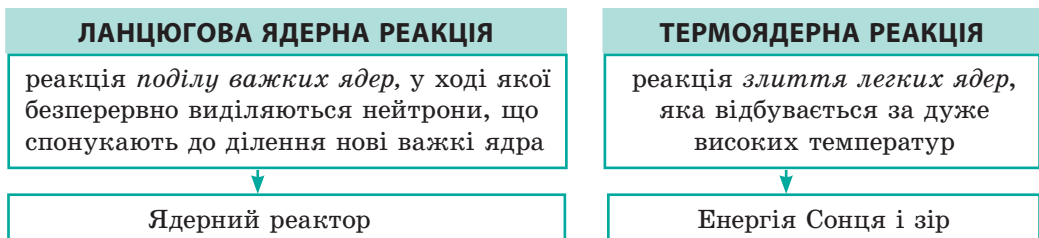
2. Ви дізнались, як було відкрито *явище радіоактивності*, з'ясували *природу радіоактивного випромінювання*.



3. Ви ознайомилися з *фізичними величинами*, які характеризують радіоактивне випромінювання, радіонукліди та радіоактивні зразки.

Фізична величина	Формула для обчислення	Одиниця		Співвідношення між одиницями
		у СІ	позасистемна	
Активність зразка	$A = \lambda N$	бекерель (Бк)	кюри (Ки)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Поглинута доза	$D = W / m$	грей (Гр)	рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Еквівалентна доза	$H = KD$	зиверт (Зв)	бер (бер)	1 бер = 0,01 Зв

4. Ви з'ясували, що внаслідок *поглинання нейтрона важким ядром* може відбутися *самовільний поділ ядра*, який супроводжується *виділенням енергії*, та дізнались, що реакція *синтезу легких ядер* теж супроводжується *виділенням енергії*.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ IV «Фізика атома та атомного ядра. Фізичні основи атомної енергетики»

Завдання 1–8, 10 містять тільки одну правильну відповідь.

- (1 бал) У ядрі атома Берилію 4 протони і 5 нейтронів. Скільки електронів в атомі Берилію?
 

а) 1 електрон;	в) 5 електронів;
б) 4 електрони;	г) 9 електронів.
- (1 бал) У ядрі хімічного елемента 33 протони та 43 нейтрони. Який це елемент?
 

а) Технецій;	б) Арсен;	в) Уран;	г) Аурум.
--------------	-----------	----------	-----------
- (1 бал) На підставі дослідів із  $\alpha$ -частинками Е. Резерфорд:
 

а) запропонував нейтронно-протонну модель атомного ядра;
б) пояснив явище радіоактивності;
в) пояснив механізм ланцюгової ядерної реакції;
г) запропонував ядерну модель будови атома.
- (1 бал) При  $\alpha$ -розпаді ядра атома деякого елемента утворюється ядро атома елемента, який у Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва розташований від вихідного елемента:
 

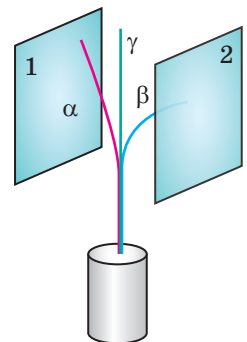
а) на дві клітинки ліворуч;	в) на одну клітинку праворуч;
б) на дві клітинки праворуч;	г) на одну клітинку ліворуч.
- (2 бали) Заряд ядра атома деякого хімічного елемента становить  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл. Який це елемент?
 

а) Калій;	б) Гелій;	в) Літій;	г) Германій.
-----------	-----------	-----------	--------------
- (2 бали) Пучок радіоактивного випромінювання розділяється, проходячи між зарядженими пластинами (див. рисунок). Яким є знак заряду кожної пластини?
 

а) пластина 1 «+», пластина 2 «-»;
б) пластина 1 «-», пластина 2 «+»;
в) пластина 1 «+», пластина 2 «+»;
г) пластина 1 «-», пластина 2 «-».
- (2 бали) Визначте активність радіоактивного зразка, якщо щогодини в ньому розпадається  $7,2 \cdot 10^{10}$  ядер. Активність зразка вважайте незмінною.
 

а) $7,2 \cdot 10^{10}$ Бк;	б) $1,2 \cdot 10^9$ Бк;	в) $3,6 \cdot 10^8$ Бк;	г) $2 \cdot 10^7$ Бк.
----------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------
- (2 бали) Термоядерна реакція синтезу відбувається за умови:
 

а) поглинання ядром нейтрона;	в) низького тиску;
б) високої температури;	г) наявності важких ядер.



9. (3 бали) Установіть відповідність між кількістю складників нукліда та власне нуклідом.

- 1 70 електронів
- 2 57 протонів
- 3 57 нейтронів
- 4 70 нуклонів

- А Неон  ${}_{10}^{21}\text{Ne}$
- Б Галій  ${}_{31}^{70}\text{Ga}$
- В Рутеній  ${}_{44}^{101}\text{Ru}$
- Г Лантан  ${}_{57}^{140}\text{La}$
- Д Ітербій  ${}_{70}^{173}\text{Yb}$

10. (3 бали) Яка з наведених нижче ядерних реакцій є реакцією  $\beta$ -розпаду?

- а)  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow X$ ;
- б)  ${}_{90}^{230}\text{Th} \rightarrow X + {}_{88}^{226}\text{Ra}$ ;
- в)  ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow X + {}_{91}^{234}\text{Pa}$ ;
- г)  ${}_{1}^3\text{T} + {}_{1}^2\text{D} \rightarrow X + {}_{2}^4\text{He}$ .

11. (3 бали) Радон  ${}_{86}^{222}\text{Rn}$  послідовно зазнав двох  $\alpha$ - і двох  $\beta$ -розпадів. Ядро якого елемента є продуктом цих розпадів?

12. (3 бали) У зразку міститься  $1,6 \cdot 10^{10}$  ядер ізотопу Бісмуту  ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ , період піврозпаду якого 20 хв. Скільки ядер Бісмуту залишиться у зразку через годину?

13. (3 бали) На даний момент часу в радіоактивному зразку міститься  $2 \cdot 10^{-10}$  моль радію. Скільки ядер Радію розпадеться наступної секунди? Стала радіоактивного розпаду Радію  $\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ c}^{-1}$ .

14. (4 бали) Середня доза випромінювання, поглинута працівником, що обслуговує рентгенівську установку, дорівнює 7 мкГр за 1 год. Чи безпечно працювати з цією установкою протягом 200 днів на рік по 6 год щоденно, якщо гранично допустима доза опромінення дорівнює 50 мГр на рік? Відомо, що природний радіаційний фон становить 2 мГр на рік.

15. (4 бали) Унаслідок трьох  $\alpha$ - і двох  $\beta$ -розпадів деякого материнського ядра утворилося ядро Полонію  ${}_{84}^{213}\text{Po}$ . Визначте материнське ядро.

16. (4 бали) Визначте, яку масу Урану-235 витрачає за добу атомна електростанція потужністю 2 ГВт, якщо її ККД становить 25 %, а під час кожного поділу ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  виділяється  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж енергії.

*Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*



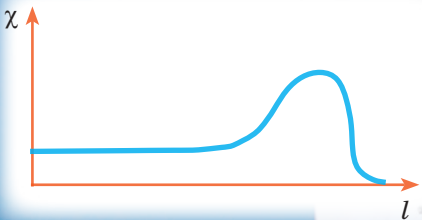
Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».



**Рис. 1.** Обладнання для радіаційної терапії



**Рис. 2.** Під час процедур медичний персонал розміщується в приміщеннях, захищених від радіації



**Рис. 3.** Схематичне зображення залежності ступеня ушкодження тканин ( $\chi$ ) від глибини пробігу ( $l$ ) протонів

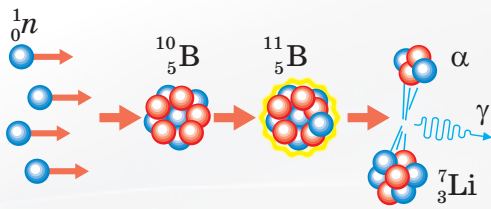
## Від експериментів Резерфорда до лікування хвороб

Більшість жителів нашої країни, пам'ятаючи про аварію на Чорнобильській АЕС, із великою підозрою ставляться до слова «радіація». Завершивши вивчення розділу IV, ви довідалися, що радіаційне випромінювання — це, звичайно, небезпечно. Але якщо дотримуватися правил безпеки, контролювати рівень радіаційного фону, вчасно вживати необхідних заходів, то небезпеку можна зменшити.

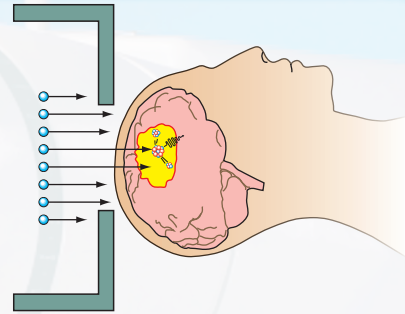
А чи може бути радіація корисною для організму? Виявляється, у випадку деяких захворювань для збереження життя пацієнта медики змушені фактично завдавати йому шкоди. Так, найпоширенішою формою радіаційної терапії є опромінення пацієнта  $\gamma$ -променями, проникна здатність яких є досить великою (рис. 1, 2). Однак під час опромінення хворого внутрішнього органа опромінюються й здорові частини тіла.

Природним було прагнення фізиків вирішити цю проблему. Перше рішення — застосування іншого типу випромінювання. Виявилось, що прискорені до великих швидкостей протони мають певні переваги перед  $\gamma$ -випромінюванням. Відомо, що протони максимально ушкоджують місця поблизу своєї зупинки, а на інших ділянках траєкторії рівень ушкоджень є значно нижчим (рис. 3). Змінюючи енергію протонів, можна змінювати місця їхньої зупинки так, щоб ці місця припадали на хворі клітини. Тоді, як видно з рис. 3, рівень ушкодження здорових тканин буде істотно нижчим,





**Рис. 4.** Схема ядерних реакцій у разі влучення нейтрона в ядро Бору



**Рис. 5.** Схема проведення БНЗТ у випадках онкозахворювання мозку

ніж хворих. Причому доза опромінення ділянки «до горба» у десятки разів нижча, а «після горба» взагалі дорівнює нулю. На жаль, висока вартість використання прискорювача протонів не дозволяє зробити цей метод масовим.

Ще один спосіб опромінення хворих тканин — *бор-нейтрон-захоплювальна терапія (БНЗТ)* — був запропонований порівняно недавно. Велика перевага БНЗТ — в її точності. Цю терапію можна порівняти з «агентом 007», що безпомилково і точно виконує своє завдання.

Ідея БНЗТ полягає ось у чому. Ключовим у терапії є *ядро атома Бору*. Саме воно, як геніальний воротар, уміє «ловити» нейтрони набагато краще, ніж будь-які інші ядра. Тому під час опромінення тканин нейтронами ядро Бору зуміє «впіймати» нейтрон, навіть якщо їх буде пролітати дуже мало. Ядра ж інших елементів практично не помітять цього опромінення, тобто шкідливу дозу опромінення нейтронами буде зведено до мінімуму.

Після того як ядро Бору «впіймає» нейтрон, воно зазнає радіоактивного перетворення й розпадається на ядро Літію та  $\alpha$ -частинку (рис. 4), які мають кінетичну енергію, що може зруйнувати лише одну клітину. Отже, якщо доправити ядро Бору безпосередньо у хвору клітину, то тільки її і буде зруйновано (рис. 5). Доставку ядер Бору здійснюють спеціальні типи лікарських препаратів.

## Орієнтовні теми проектів

1. Ознайомлення з роботою побутового дозиметра.
2. Складання радіаційної карти регіону.
3. Радіологічний аналіз місцевих харчових продуктів.
4. Екологічні проблеми атомної енергетики.
5. Розщеплення атома: скринька Пандори чи вогонь Прометея?
6. Майбутнє Сонця та інших зір.

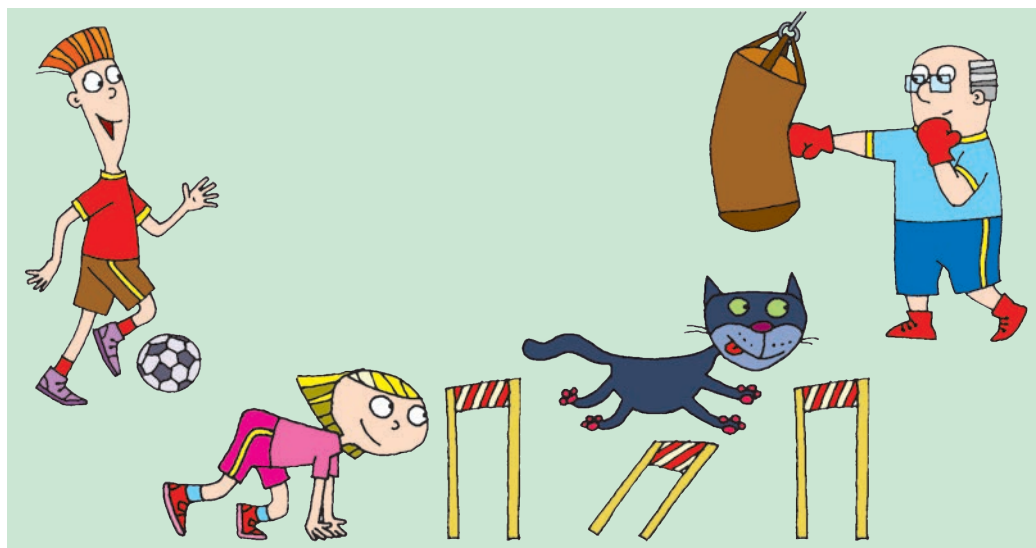
## Теми рефератів і повідомлень

1. Великий адронний колайдер — шлях до вивчення будови Всесвіту.
2. Історія атома: від Демокріта до Резерфорда.
3. Цеглинки матерії, або Що таке кварки.
4. Науковий подвиг П'єра і Марії Кюрі (історія відкриття радію).
5. Як Резерфорд установив природу  $\alpha$ -частинок.
6. Історія створення ядерного реактора.
7. Перші атомні електростанції.
8. Організація безпеки атомних реакторів.
9. Чорнобиль і Фукусіма — дві величезні ядерні катастрофи: що в них спільного, в чому різниця.
10. Термоядерний реактор — реактор майбутнього.
11. Драма ідей: історія атомної бомби.
12. Історія отримання штучних радіоактивних ізотопів.
13. Де і як застосовують штучні радіоактивні ізотопи.
14. Ядерно-фізичні методи вивчення віку археологічних знахідок.
15. Що таке радонові ванни.
16. Природна радіоактивність — безпечна чи небезпечна.
17. Хронологія атомної ери.
18. Атомні електростанції України.
19. Атомна енергетика світу.

# РОЗДІЛ V

## РУХ І ВЗАЄМОДІЯ. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ

- Ви можете визначити шлях у разі руху з незмінною швидкістю, а тепер дізнаєтесь, як знайти подоланий тілом шлях, коли воно сповільнює або, навпаки, прискорює свій рух
- Ви певно чули прислів'я «Як гукнеться, так і відгукнеться», а тепер дізнаєтесь, який закон Ньютона можна сформулювати саме так
- Ви знаєте, що під час ходьби ви відштовхуєтесь від поверхні дороги, а тепер дізнаєтесь, від чого відштовхується ракета, рухаючись у космічному просторі
- Ви знаєте, що швидкість руху автомобіля вимірюють спідометром, а тепер дізнаєтесь, як виготовити пристрій для вимірювання швидкості руху кулі
- Ви знаєте про закон збереження енергії, а тепер дізнаєтесь про закон збереження імпульсу



## i

## § 28. РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. ПРИСКОРЕННЯ. ШВИДКІСТЬ РІВНОПРИСКОРЕНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

Вивчаючи фізику в 7 класі, ви дізналися про механічний рух і докладно ознайомилися з найпростішим його різновидом — рівномірним прямолінійним рухом. *Розділ механіки, що вивчає рух тіл і при цьому не розглядає причин, якими цей рух викликаний, називається кінематикою* (від. грецьк. «кінематос» — рух). Ми продовжимо вивчати кінематику, і сьогодні ви дізнаєтесь про рівноприскорений прямолінійний рух і фізичні величини, що його характеризують. Але спочатку згадаємо основні поняття кінематики.

### 1 Повторюємо кінематику

**Механічний рух** — це зміна з часом положення тіла в просторі відносно інших тіл.

- ? Розгляньте рис. 28.1. Відносно яких тіл рухаються зображені на рисунку тіла? Відносно яких тіл вони перебувають у стані спокою? Чому механічний рух називають відносним?

Описуючи механічний рух тіла, ми зазвичай не розглядали рух окремих його точок, а зверталися до механічної моделі тіла — *матеріальної точки*. Далі, розв'язуючи задачі на механічний рух тіла, ми також вважатимемо тіло матеріальною точкою.

**Матеріальна точка** — це фізична модель тіла, розмірами якого в умовах задачі можна знехтувати.

- ? У якому випадку тіла, зображені на рис. 28.1, можна вважати матеріальними точками?

Залежно від форми **траєкторії** розрізняють криволінійний і прямолінійний рухи. Довжина траєкторії дорівнює шляху, який пододало тіло. **Шлях  $l$**  — це скалярна фізична величина. А от **переміщення  $\vec{s}$**  — напрямлений відрізок прямої, який з'єднує початкове і кінцеве положення тіла, — це векторна фізична величина (рис. 28.2).

Якщо тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення, то такий механічний рух називають **рівномірним прямолінійним**. Швидкість  $\vec{v}$  такого руху не змінюється ані за значенням, ані за напрямком; напрямок вектора швидкості збігається з напрямком переміщення ( $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{s}$ );



Рис. 28.1. Деякі приклади механічного руху тіл

модуль швидкості рівномірного прямолінійного руху обчислюють за формулою  $v = \frac{s}{t}$ .

Отже, озброївшись знаннями з попереднього курсу фізики, продовжимо вивчення кінематики.

## 2 Даємо означення прискорення

Проведемо простий дослід, для якого візьмемо довгий жолоб і кульку. Піднявши один край жолоба, покладемо на нього кульку й відпустимо. Кулька почне скочуватися (рис. 28.3, а). Бачимо: чим далі буде кулька від верхнього краю жолоба, тим більшу відстань вона долатиме за 1 с. Це означає, що швидкість руху кульки з часом збільшується.

Повторимо дослід, збільшивши кут нахилу жолоба (рис. 28.3, б), — у цьому випадку швидкість руху кульки збільшуватиметься ще швидше. Кажуть, що кулька рухається з більшим *прискоренням*.

**Прискорення** — це векторна фізична величина, яка характеризує швидкість зміни швидкості руху тіла й дорівнює відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, за який ця зміна відбулася:

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

де  $\vec{a}$  — прискорення руху тіла;  $\vec{v}_0$  — початкова швидкість (швидкість руху тіла в момент початку відліку часу);  $\vec{v}$  — швидкість руху тіла через інтервал часу  $t$ .

Щоб уникнути складних математичних дій із векторами, будемо використовувати дану формулу, записану в проекціях на вісь координат (наприклад, на вісь  $OX$ ):

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

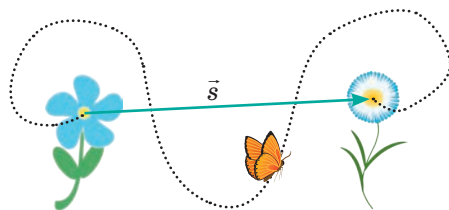


Рис. 28.2. Переміщення показує, в якому напрямку та на яку відстань перемістилося тіло за певний інтервал часу

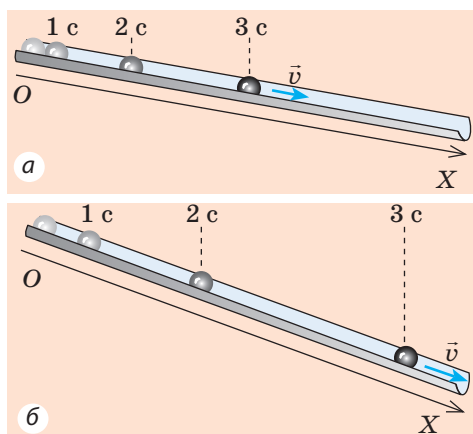
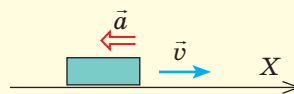


Рис. 28.3. Положення кульки, що скочується жолобом, через 1 с, 2 с і 3 с після початку руху

### Повторимо математику



- Якщо напрямок вектора збігається з напрямком осі координат, то проекція вектора на цю вісь дорівнює модулю вектора.
- Якщо напрямок вектора протилежний напрямку осі координат, то проекція вектора на цю вісь дорівнює модулю вектора, узятому зі знаком «-».

Для випадку, поданого на рисунку:  $a_x = -a$ ;  $v_x = v$ .

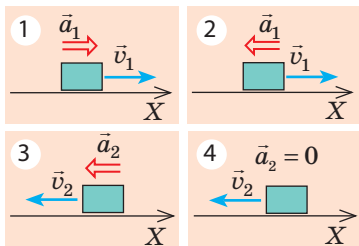
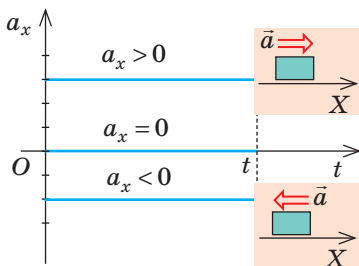


Рис. 28.4. До завдання в § 28



Рис. 28.5. Прямуючи до школи, ви то швидше, то повільніше збільшуєте швидкість свого руху, іноді сповільнюєте свій рух, а якісь інтервали часу рухаєтеся з незмінною швидкістю

Рис. 28.6. Графік залежності  $a_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху

Одиниця прискорення в СІ — метр на секунду в квадраті:

$$[a] = \frac{1 \text{ м/с}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Напрямок прискорення збігається з напрямком рівнодійної сил, які діють на тіло.

- Якщо прискорення напрямлене в бік руху тіла ( $\vec{a} \uparrow \vec{v}$ ), то швидкість руху тіла збільшується (рівнодійна «підштовхує» і розганяє тіло).
- Якщо прискорення напрямлене протилежно до руху тіла ( $\vec{a} \downarrow \vec{v}$ ), то швидкість руху тіла зменшується (рівнодійна «заважає» рухові й сповільнює його).
- Якщо  $a = 0$ , то сили, які діють на тіло, скомпенсовані й тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває у стані спокою.

**?** Для кожного випадку (рис. 28.4) з'ясуйте, збільшується чи зменшується швидкість руху тіла в даний момент часу. Наведіть приклади таких рухів.

### 3 Дізнаємося, який рух називають рівноприскореним прямолінійним

Якщо тіло рухається нерівномірно, його швидкість безперервно змінюється, причому зазвичай за рівні інтервали часу швидкість руху тіла змінюється неоднаково (рис. 28.5). У цьому навчальному році ви розглядатимете найпростіший вид прискореного руху — *рівноприскорений прямолінійний рух* і довідаєтесь, що такий рух буває, якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, є незмінною.

**Рівноприскорений прямолінійний рух** — це рух, під час якого швидкість руху тіла за будь-які рівні інтервали часу змінюється однаково.

Інакше кажучи, *рівноприскорений прямолінійний рух* — це рух, під час якого тіло рухається прямолінійною траєкторією з незмінним прискоренням. Під час такого руху прискорення тіла не змінюється з часом, тому графік залежності  $a_x(t)$  являє собою відрізок прямої, паралельної осі часу (рис. 28.6).

#### 4 Визначаємо швидкість рівноприскореного прямолінійного руху

Якщо тіло рухається рівноприскорено, то швидкість його руху весь час змінюється. Тому далі, говорячи про швидкість руху тіла, матимемо на увазі його *миттєву швидкість*.

**Миттєва швидкість** — це швидкість руху тіла в даний момент часу, швидкість руху в даній точці траєкторії.

Для обчислення швидкості рівноприскореного прямолінійного руху тіла скористаємось означенням прискорення. Оскільки  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , то

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

Будемо використовувати цю формулу, записану в проекціях на вісь  $OX$ , яку спрямуємо вздовж траєкторії руху тіла:

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

Якщо задано рівняння проекції швидкості руху тіла, то задано й початкову швидкість ( $\vec{v}_0$ ), і прискорення ( $\vec{a}$ ) руху цього тіла.

Наприклад, рівняння проекції швидкості має вигляд:  $v_x = 20 - 3t$ . Це означає, що  $v_{0x} = 20$  м/с (початкова швидкість дорівнює 20 м/с, а її напрямок збігається з напрямком осі  $OX$ );  $a_x = -3$  м/с<sup>2</sup> (прискорення дорівнює 3 м/с<sup>2</sup>, а знак «-» показує, що напрямок прискорення протилежний напрямку осі  $OX$ ).

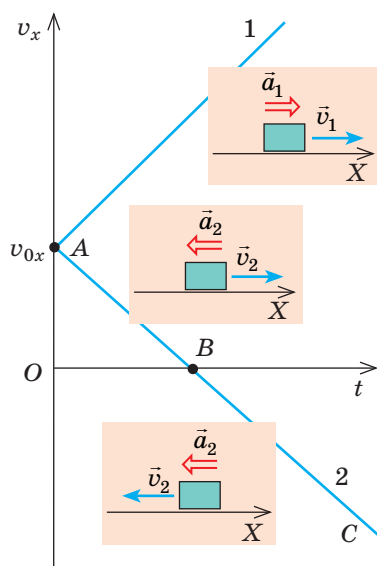
**?** Визначте початкову швидкість і прискорення руху тіла, якщо рівняння проекції швидкості має вигляд:  $v_x = -10 + 2t$ .

Залежність  $v_x = v_{0x} + a_x t$  є лінійною, тому графік проекції швидкості — графік залежності  $v_x(t)$  — це відрізок прямої, нахиленої під певним кутом до осі часу (рис. 28.7).

У момент  $t = 0$  швидкість руху тіла дорівнює його початковій швидкості ( $v_x = v_{0x}$ ), тобто графік  $v_x(t)$  починається на осі ординат у точці з координатами  $(0; v_{0x})$ .

Якщо проекція прискорення є додатною ( $a_x > 0$ ), то графік швидкості підіймається (графік 1 на рис. 28.7). Якщо проекція прискорення є від'ємною ( $a_x < 0$ ), то графік швидкості опускається (графік 2 на рис. 28.7).

*Зверніть увагу:* точка  $B$  графіка 2 на рис. 28.7 — це **точка розвороту**.



**Рис. 28.7.** Графіки залежності  $v_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху.

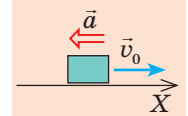
Тіло 1 весь час збільшує швидкість свого руху:  $\vec{a}_1 \uparrow \vec{v}_1$ . Тіло 2 спочатку сповільнює свій рух:  $\vec{a}_2 \downarrow \vec{v}_2$  (ділянка  $AB$ ), потім зупиняється (точка  $B$ ), після чого набирає швидкість, рухаючись у протилежному напрямку, оскільки  $\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$  (ділянка  $BC$ )

**5** Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** Автомобіль, що рухається зі швидкістю 90 км/год, зупиняється перед світлофором. Визначте час гальмування автомобіля, вважаючи його рух рівноприскореним прямолінійним із прискоренням 5 м/с<sup>2</sup>.

*Аналіз фізичної проблеми.* Автомобіль зупиняється, тож його кінцева швидкість дорівнює нулю ( $v = 0$ ), а напрямком вектора прискорення протилежний напрямку швидкості.

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зазначимо вісь координат (її напрямком нехай збігається з напрямком руху), напрямком початкової швидкості та напрямком прискорення руху автомобіля.



*Дано:*

$$\begin{aligned} v_0 &= 90 \text{ км/год} = \\ &= 25 \text{ м/с} \\ a &= 5 \text{ м/с}^2 \\ v &= 0 \end{aligned}$$

*Знайти:*

$t$  — ?

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Рух є рівноприскореним, тому  $v_x = v_{0x} + a_x t$ .

Скориставшись рисунком, конкретизуємо це рівняння:

$$v_{0x} = v_0, \quad a_x = -a, \quad v_x = 0, \quad \text{отже:}$$

$$0 = v_0 - at \Rightarrow v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с} \cdot \text{м}} = \text{с}; \quad t = \frac{25}{5} = 5 \text{ (с)}.$$

*Відповідь:*  $t = 5 \text{ с}$ .

**Задача 2.** Тіло рухалося прямолінійно вздовж осі  $OX$ . За поданим на рис. 28.8 графіком залежності  $v_x(t)$ : 1) опишіть характер руху тіла; 2) запишіть рівняння проекції швидкості руху; 3) побудуйте графік залежності проекції прискорення руху від часу.

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

1. Графік  $v_x(t)$  — пряма лінія, тож рух тіла рівноприскорений.

Перші 4 с тіло рухалося у напрямку, протилежному напрямку осі  $OX$  (проекція швидкості є від'ємною), а швидкість руху тіла зменшувалась.

У момент  $t = 4$  с тіло зупинилося, після чого почало рухатись у зворотному напрямку (знак проекції швидкості змінився на протилежний).

Протягом наступних 3 с тіло рухалося у напрямку осі  $OX$ , а швидкість його руху збільшувалась.

2. Запишемо рівняння проекції швидкості руху в загальному вигляді:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Конкретизуємо це рівняння:

а) за графіком знайдемо проекцію початкової швидкості:  $v_{0x} = -8 \text{ м/с}$ .

б) оберемо на графіку довільну точку, наприклад точку, якій відповідають  $t = 4$  с і  $v_x = 0$ , і знайдемо проекцію прискорення:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{0 - (-8 \text{ м/с})}{4 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2;$$



в) підставимо одержані значення в рівняння проекції швидкості руху:

$$v_x = -8 + 2t.$$

3. Прискорення тіла є незмінним ( $a_x = 2 \text{ м/с}^2$ ), тому графік  $a_x(t)$  — пряма, паралельна осі часу й розташована вище від цієї осі (рис. 28.9).

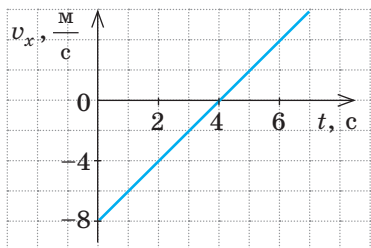


Рис. 28.8. До задачі 2 у § 28

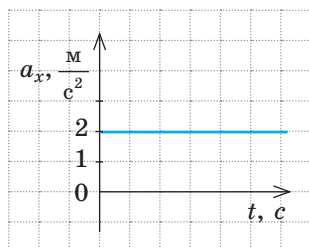


Рис. 28.9. До задачі 2 у § 28



### Підбиваємо підсумки

Рівноприскорений прямолінійний рух — це такий рух, під час якого швидкість руху тіла за будь-які рівні інтервали часу змінюється однаково. Прискорення  $\vec{a}$  — це векторна фізична величина, яка характеризує швидкість зміни швидкості руху тіла й дорівнює відношенню зміни швидкості руху до інтервалу часу, за який ця зміна відбулась:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ .

Одиниця прискорення в СІ — метр на секунду в квадраті ( $\text{м/с}^2$ ).

Для рівноприскореного руху:

- графік проекції прискорення  $a_x(t)$  — пряма, паралельна осі часу;
- швидкість руху змінюється лінійно:  $v_x = v_{0x} + a_x t$ ;
- графік проекції швидкості руху  $v_x(t)$  — відрізок прямої, нахиленої під певним кутом до осі часу.



### Контрольні запитання

1. Який рух називають рівноприскореним прямолінійним? 2. Дайте означення прискорення. 3. Якою є одиниця прискорення в СІ? 4. Який вигляд має графік залежності  $a_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху? 5. Запишіть рівняння залежності  $v_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху. Який вигляд має графік цієї залежності? 6. Як рухається тіло, якщо напрямком його прискорення: а) збігається з напрямком швидкості руху? б) протилежний напрямку швидкості руху? Як рухається тіло, якщо його прискорення дорівнює нулю?



### Вправа № 28

1. Чи може тіло рухатися з великою швидкістю, але з малим прискоренням?
2. Із яким прискоренням рухається автомобіль, що рушає з місця, якщо через 10 с після початку руху він набуває швидкості 15 м/с?
3. Кульку штовхнули вгору похилою площиною, надавши швидкості 2 м/с. Визначте швидкість руху кульки через 0,5 с; через 1 с; через 1,5 с після початку руху, якщо прискорення руху кульки 2 м/с<sup>2</sup>. Поясніть результати.

4. Під час прямолінійного руху з незмінним прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$  велосипедист сягає швидкості  $5 \text{ м/с}$  за  $25 \text{ с}$ . Якою була початкова швидкість руху велосипедиста?
5. Скільки часу потрібно автобусу для зміни швидкості руху від  $54 \text{ км/год}$  до  $5 \text{ м/с}$ ? Прискорення автобуса є незмінним і дорівнює  $0,5 \text{ м/с}^2$ .
6. Дано рівняння проекції швидкості руху для трьох тіл, які рухаються вздовж осі  $OX$ : а)  $v_x = 2 + t$ ; б)  $v_x = -20 + 5t$ ; в)  $v_x = 10 - 3t$ . Усі величини подано в одиницях СІ. Для кожного тіла з'ясуйте: 1) як рухалося тіло; 2) якими є початкова швидкість і прискорення руху тіла; 3) якщо тіло зупиниться, то через який час.
7. На рис. 1 подано графіки залежності  $a_x(t)$  для двох тіл. Для кожного тіла запишіть рівняння залежності  $v_x(t)$  і побудуйте графік цієї залежності, якщо  $v_{01x} = -4 \text{ м/с}$ ,  $v_{02x} = 8 \text{ м/с}$ .
8. На рис. 2 подано графіки залежності  $v_x(t)$  для чотирьох тіл. Для кожного тіла запишіть рівняння проекції швидкості руху, побудуйте графік залежності  $a_x(t)$ .
9. Тіло рухалося рівноприскорено тривалий час. На рис. 3 подано графік залежності  $v_x(t)$  для цього тіла починаючи з певного моменту часу. Визначте час, коли тіло змінило напрямок швидкості свого руху.



10. Skorиставшись рис. 3, визначте шлях, який пододало тіло за перші  $4 \text{ с}$  спостереження.

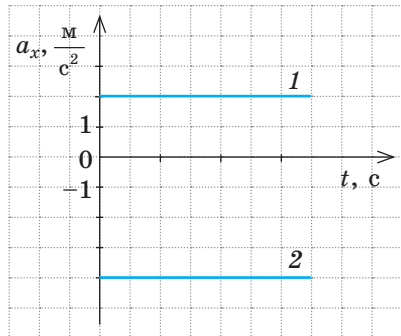


Рис. 1

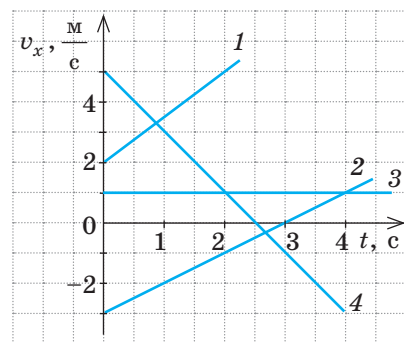


Рис. 2

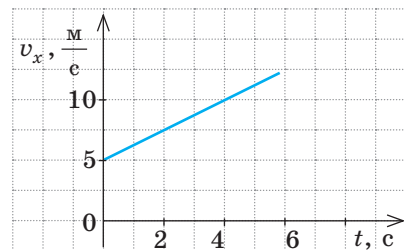


Рис. 3

## § 29. ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІД ЧАС РІВНОПРИСКОРЕНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ. РІВНЯННЯ КООРДИНАТИ

Ви, мабуть, бачили по телевізору: на дорозі сталася аварія, і фахівці вимірюють гальмівний шлях. Навіщо? Щоб визначити швидкість руху автомобіля на початку гальмування, а також прискорення в ході гальмування. Ці дані потім використовують для з'ясування причини аварії: чи то водій перевищив дозволену швидкість, чи то несправними були гальма, чи, може, з автомобілем усе гаразд і винен, наприклад, пішохід, який порушив правила дорожнього руху. Як, знаючи час гальмування й гальмівний шлях, визначити швидкість і прискорення руху тіла, ви довідаєтесь із цього параграфа.

### 1 Дізнаємося про геометричний зміст проекції переміщення

У 7 класі ви дізналися, що для будь-якого руху шлях чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності модуля швидкості руху від часу спостереження. Аналогічна ситуація і з визначенням проекції переміщення (рис. 29.1).

Отримаємо формулу для обчислення проекції переміщення тіла за інтервал часу від  $t_1 = 0$  до  $t_2 = t$ . Розглянемо рівноприскорений рух, за якого початкова швидкість і прискорення мають однаковий напрямок із віссю  $Ox$ . У цьому випадку графік проекції швидкості має вигляд, поданий на рис. 29.2, а проекція переміщення чисельно дорівнює площі трапеції  $OABC$ :

$$S_{OABC} = \frac{OA + BC}{2} \cdot OC.$$

На графіку відрізок  $OA$  відповідає проекції початкової швидкості  $v_{0x}$ , відрізок  $BC$  — проекції кінцевої швидкості  $v_x$ , а відрізок  $OC$  — інтервалу часу  $t$ . Замінивши зазначені відрізки відповідними фізичними величинами та взявши до уваги, що  $s_x = S_{OABC}$ , отримаємо формулу для визначення проекції переміщення:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t \quad (1)$$

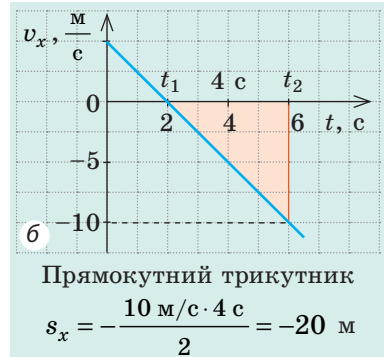
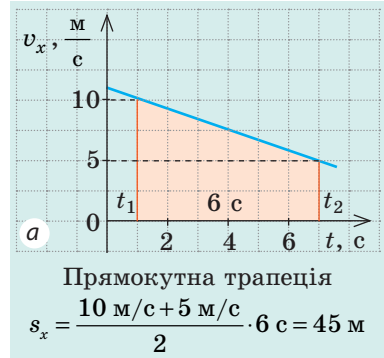
Зазначимо, що формула (1) буде справедливою для будь-якого рівноприскореного прямолінійного руху.

**?** Скориставшись формулою (1), визначте переміщення тіла, графік руху якого подано на рис. 29.1, б, за 2 с і за 4 с після початку відліку часу. Поясніть відповідь.

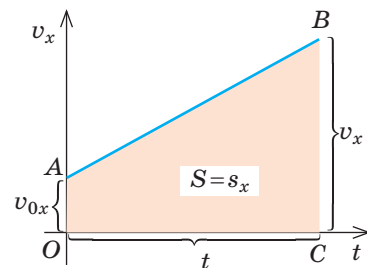
### 2 Запишемо рівняння проекції переміщення

Виключимо змінну  $v_x$  із формули (1). Для цього згадаємо, що за рівноприскореного прямолінійного руху  $v_x = v_{0x} + a_x t$ . Підставивши вираз для  $v_x$  у формулу (1), отримаємо:

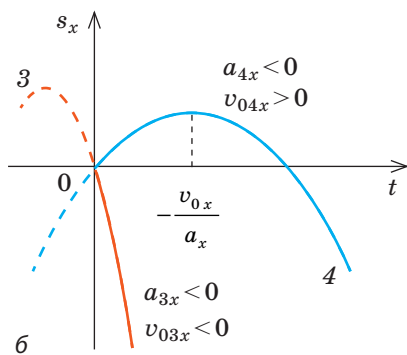
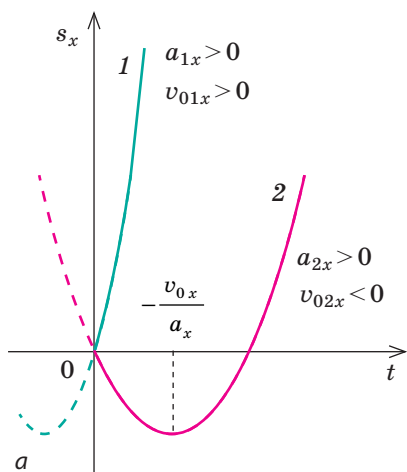
$$s_x = \frac{v_{0x} + v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = \frac{2v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2.$$



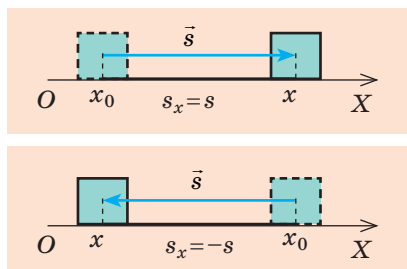
**Рис. 29.1.** Геометричний зміст переміщення: проекція переміщення чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком  $v_x(t)$ , віссю часу та прямими  $t = t_1$  і  $t = t_2$ .  $s_x > 0$ , якщо отримана фігура розташована над віссю часу (а);  $s_x < 0$ , якщо отримана фігура розташована під віссю часу (б)



**Рис. 29.2.** До виведення формули проекції переміщення



**Рис. 29.3.** Графік проекції переміщення в разі рівноприскореного прямолінійного руху — парабола, яка проходить через початок координат: якщо  $a_x > 0$ , вітки параболи направлені вгору (а); якщо  $a_x < 0$ , вітки параболи направлені вниз (б)



**Рис. 29.4.** Вибір осі координат у випадку прямолінійного руху

Отже, для рівноприскореного прямолінійного руху одержано **рівняння проекції переміщення**:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2 \quad (2)$$

Оскільки величини  $v_{0x}$  і  $a_x$  не залежать від часу спостереження, залежність  $s_x(t)$  є *квадратичною*. Наприклад, якщо  $v_{0x} = 2$  м/с, а  $a_x = -1$  м/с<sup>2</sup>, то рівняння  $s_x(t)$  матиме вигляд:  $s_x = 2t - 0,5t^2$ .

Отже, *графік проекції переміщення* в разі рівноприскореного прямолінійного руху — **парабола** (рис. 29.3), вершина якої відповідає точці розвороту:

$$v_x = 0 \Rightarrow v_{0x} + a_x t = 0 \Rightarrow t = -\frac{v_{0x}}{a_x},$$

де  $t$  — час руху тіла до моменту розвороту.

Скориставшись означенням прискорення  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$  і формулою  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ , можна одержати ще одну формулу для обчислення проекції переміщення в разі рівноприскореного прямолінійного руху:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x} \quad (3)$$

Формулою (3) зручно користуватися, якщо в умові задачі не йдеться про час руху тіла та не потрібно його визначати.

**?** Сподіваємося, що вам нескладно буде вивести формулу (3) самостійно.

*Зверніть увагу:* в кожній з отриманих формул (1–3) проекції  $v_x$ ,  $v_{0x}$  і  $a_x$  можуть бути як додатними, так і від'ємними — залежно від того, як направлені вектори  $\vec{v}$ ,  $\vec{v}_0$  і  $\vec{a}$  відносно осі  $OX$ .

### 3 Запишемо рівняння координати

Одне з основних завдань механіки полягає у визначенні положення тіла (координат тіла) в будь-який момент часу. Ми розглядаємо прямолінійний рух, тому

досить обрати лише одну вісь координат (наприклад, вісь  $OX$ ), яку слід спрямувати вздовж руху тіла (рис. 29.4). Із рис. 29.4 бачимо, що незалежно від напрямку руху координату  $x$  тіла можна визначити за формулою:

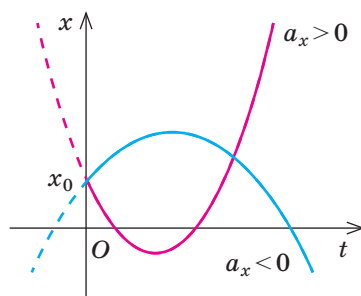
$$x = x_0 + s_x,$$

де  $x_0$  — початкова координата (координата тіла в момент початку спостереження);  $s_x$  — проекція переміщення.

Для рівноприскореного прямолінійного руху  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ , тому для такого руху **рівняння координати** має вигляд:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$$

Проаналізувавши останнє рівняння, доходимо висновку, що залежність  $x(t)$  є квадратичною, тому *графік координати — парабола* (рис. 29.5).



**Рис. 29.5.** У разі рівноприскореного прямолінійного руху графік залежності координати від часу — парабола, яка перетинає вісь  $x$  у точці  $x_0$

#### 4 Учимося розв'язувати задачі

Основні етапи розв'язування задач на рівноприскорений прямолінійний рух розглянемо на прикладах.

##### Послідовність дій

1. Уважно прочитайте умову задачі. З'ясуйте, які тіла беруть участь у русі, яким є характер руху тіл, які параметри руху відомі.

2. Запишіть коротку умову задачі. У разі необхідності переведіть значення фізичних величин в одиниці СІ.

3. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому позначте вісь координат, напрямки швидкості руху, переміщення, початкової швидкості руху, прискорення.

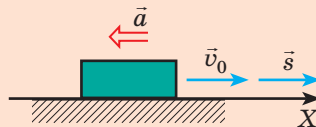
##### Приклад розв'язування задачі

**Задача 1.** Після початку гальмування потяг пройшов до зупинки 225 м. Якою була швидкість руху потяга перед початком гальмування? Вважайте, що прискорення потяга є незмінним і дорівнює  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

Дано:  $s = 225 \text{ м}$   
 $a = 0,5 \text{ м/с}^2$   
 $v = 0$

Знайти:  $v_0$  — ?

На пояснювальному рисунку спрямуємо вісь  $OX$  у напрямку руху потяга. Оскільки потяг зменшує свою швидкість, то  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$ .



4. Із формул, що описують прямолінійний рівноприскорений рух, виберіть ті, які найбільше відповідають умові задачі.

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}; v_x = v_{0x} + a_x t;$$

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2};$$

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}; s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t.$$

Обрані формули конкретизуйте для задачі.

Із умови задачі відомі  $a$ ,  $v$  і  $s$ , потрібно знайти  $v_0$ . Усі ці фізичні величини входять до формули  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ .

Напрямок переміщення та напрямок початкової швидкості збігаються з напрямком осі  $OX$ , тому  $s_x = s$ ,  $v_{0x} = v_0$ .

Напрямок прискорення протилежний напрямку осі  $OX$ , тому  $a_x = -a$ .

За умовою кінцева швидкість  $v = 0$ .

Підставимо одержані дані у формулу

$$\text{переміщення: } s = \frac{0 - v_0^2}{-2a} = \frac{v_0^2}{2a}.$$

5. Розв'яжіть задачу в загальному вигляді.

Із формули  $s = \frac{v_0^2}{2a}$  знайдемо  $v_0$  —

початкову швидкість руху:  $v_0^2 = 2as$ , звідки  $v_0 = \sqrt{2as}$ .

6. Перевірте одиницю, знайдіть значення шуканої величини.

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v = \sqrt{2 \cdot 225 \cdot 0,5} = \sqrt{225} = 15 \text{ (м/с)}.$$

7. Запишіть і проаналізуйте результат.

$v_0 = 15 \text{ м/с} = 54 \text{ км/год}$  — цілком реальна швидкість руху для потяга.

8. Запишіть відповідь.

*Відповідь:*  $v_0 = 54 \text{ км/год}$ .

1. Уважно прочитайте умову задачі. З'ясуйте, яким є характер руху тіл, які параметри руху відомі.

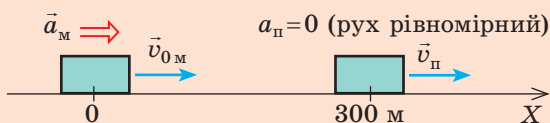
**Задача 2.** Прямолінійною ділянкою дороги йде пішохід із незмінною швидкістю 2 м/с. Його наздоганяє мотоцикл, який збільшує швидкість, рухаючись із прискоренням 2 м/с<sup>2</sup>. Через який час мотоцикл обжене пішохода, якщо на момент початку відліку часу відстань між ними становила 300 м, а мотоцикл рухався зі швидкістю 22 м/с? Яку відстань подолає мотоцикл за цей час?

2. Запишіть коротку умову задачі. У разі необхідності переведіть значення фізичних величин в одиниці СІ.

$$\begin{aligned} \text{Дано: } v_{\text{П}} &= 2 \text{ м/с} \\ a_{\text{М}} &= 2 \text{ м/с}^2 \\ l &= 300 \text{ м} \\ v_{0\text{М}} &= 22 \text{ м/с} \end{aligned}$$

*Знайти:*  $t$  — ?  $s_{\text{М}}$  — ?

3. Виконайте рисунок, на якому зазначте вісь координат, положення тіл, напрямки прискорень і швидкостей.



4. Запишіть рівняння координати в загальному вигляді; скориставшись рисунком, конкретизуйте це рівняння для кожного тіла.

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$$

<i>Мотоцикл</i>	<i>Пішохід</i>
$x_0 = 0,$	$x_0 = 300 \text{ м},$
$v_{0x} = 22 \text{ м/с};$	$v_x = 2 \text{ м/с};$
$a_x = 2 \text{ м/с}^2;$	$a = 0;$
$x_M = 22t + t^2.$	$x_P = 300 + 2t.$

5. Ураховавши, що в момент зустрічі (обгону) координати тіл однакові, отримайте квадратне рівняння.

$$x_M = x_P;$$

$$22t + t^2 = 300 + 2t;$$

$$22t + t^2 - 2t - 300 = 0 \Rightarrow t^2 + 20t - 300 = 0.$$

6. Розв'яжіть отримане рівняння та знайдіть час зустрічі тіл.

$$D = 20^2 + 4 \cdot 300 = 1600; \quad t_1 = \frac{-20 + 40}{2} = 10 \text{ (с);}$$

$$t_2 = \frac{-20 - 40}{2} = -30 \text{ (с) — сторонній корінь (виходячи з умови задачі).}$$

7. Обчисліть координату тіл у момент зустрічі.

$$x_M = x_P = 300 + 2t = 300 + 2 \cdot 10 = 320 \text{ (м).}$$

8. Знайдіть шукану величину та проаналізуйте результат.

Мотоцикл був у точці з координатою  $x_{0M} = 0$ , а обігнав пішохода в точці з координатою  $x_M = 320 \text{ м}$ , отже, мотоцикл подолав відстань 320 м. Пішохід за цей час подолав лише 20 м. Це реальний результат.

9. Запишіть відповідь.

*Відповідь:*  $t = 10 \text{ с}; s_M = 320 \text{ м}.$



### Підбиваємо підсумки

Для рівноприскореного прямолінійного руху тіла:

- проекція переміщення чисельно дорівнює площі фігури під графіком проекції швидкості руху, — графіком залежності  $v_x(t)$ :  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ , — у цьому полягає геометричний зміст переміщення;
- рівняння проекції переміщення має вигляд:  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$  — це квадратична функція, тому графік залежності  $s_x(t)$  — парабола, вершина якої відповідає точці розвороту;
- координату тіла визначають із рівняння  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ ; графік координати — парабола.



### Контрольні запитання

1. За допомогою яких формул можна обчислити проекцію переміщення  $s_x$  для рівноприскореного прямолінійного руху? Виведіть ці формули. 2. Доведіть, що графіком залежності переміщення тіла від часу спостереження є парабола. Як напрямлені вітки цієї параболи? Якому моменту руху відповідає вершина параболи? 3. Запишіть рівняння координати для рівноприскореного прямолінійного руху. Назвіть фізичні величини, які пов'язує це рівняння.



### Вправа № 29

- Лижник, що рухається зі швидкістю 1 м/с, починає спускатися з гори. Визначте довжину спуску, якщо лижник проїхав його за 10 с. Вважайте, що прискорення лижника було незмінним і дорівнювало  $0,5 \text{ м/с}^2$ .
- Пасажирський потяг загальмував, змінивши свою швидкість від 54 км/год до 5 м/с. Визначте відстань, яку пройшов потяг під час гальмування, якщо прискорення потяга було незмінним і дорівнювало  $1 \text{ м/с}^2$ .
- Гальмо легкового автомобіля є справним, якщо за швидкості 8 м/с гальмівний шлях автомобіля дорівнює 7,2 м. Визначте час гальмування та прискорення руху автомобіля.

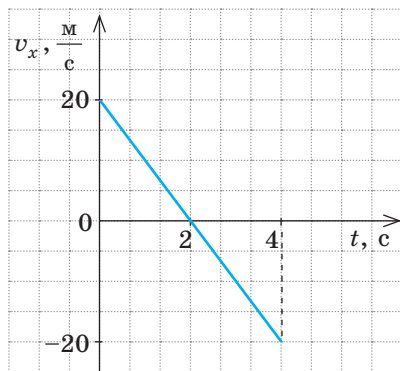
4. Рівняння координат двох тіл, які рухаються вздовж осі  $OX$ , мають вигляд:  
 $x_1 = 8 - 2t + t^2$ ;  $x_2 = -2 - 5t + 2t^2$ .

1) Для кожного тіла визначте: а) яким є його рух; б) початкову координату; в) модуль і напрямок початкової швидкості; г) прискорення руху.

2) Знайдіть час і координату зустрічі тіл.

3) Для кожного тіла запишіть рівняння  $v_x(t)$  і  $s_x(t)$ , побудуйте графіки проєкцій швидкості та переміщення.

5. На рисунку подано графік проєкції швидкості руху для деякого тіла. Визначте шлях і переміщення тіла протягом 4 с від початку відліку часу. Запишіть рівняння координати, якщо в момент часу  $t=0$  тіло було в точці з координатою  $-20 \text{ м}$ .



6. Два автомобілі почали рух з одного пункту в одному напрямку, причому другий автомобіль виїхав на 20 с пізніше. Обидва автомобілі рухаються рівноприскорено з прискоренням  $0,4 \text{ м/с}^2$ . Через який інтервал часу після початку руху першого автомобіля відстань між ними буде 240 м?



7. Ескалатор у метро піднімається зі швидкістю 2,5 м/с. Чи може людина на ескалаторі перебувати в стані спокою в системі відліку, пов'язаній із Землею? Якщо може, то за яких умов? Чи можна за цих умов рух людини вважати рухом за інерцією? Обґрунтуйте свою відповідь.



## § 30. ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ. ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Ми вже говорили про геніального англійського вченого *Ісаака Ньютона* (1642–1727). За свої наукові заслуги він навіть одержав лицарське звання й титул лорда. «Природа для нього була відкритою книгою, яку він читав без зусиль», — писав про цього вченого *А. Ейнштейн* (1879–1955). У роботі «Математичні начала натуральної філософії» (1687 р.) Ньютон сформулював «аксіоми руху» — їх тепер називають *законами Ньютона*. Про перший закон Ньютона йтиметься в цьому параграфі.

### 1 Згадаємо закон інерції

Згадаємо з курсу фізики 7 класу, за яких умов тіло перебуває в стані спокою або рухається рівномірно прямолінійно. Ви напевно пам'ятаєте **закон інерції**, який наприкінці XVI ст. експериментально встановив італійський учений *Галілео Галілей* (1564–1642):

Тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває у стані спокою лише тоді, коли на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані (рис. 30.1, 30.2).

? Як ви вважаєте, чи буде рухатися космічний корабель, що перебуває вдалині від зір, якщо вимкнути його двигуни? Якщо буде рухатися, то як?

### 2 Вивчаємо інерціальні системи відліку

Явище збереження тілом стану спокою або рівномірного прямолінійного руху за умови, що на нього не діють інші тіла та поля або їхні дії скомпенсовані, називають **явищем інерції**.

Але стани руху і спокою залежать від вибору системи відліку (СВ). А чи в кожній СВ спостерігається явище інерції?

Уявіть, що ви сидите в купе потяга, який стоїть на пероні. На столику в купе лежить м'ячик. На м'ячик діють два тіла: Земля та столик. Дії Землі та столика скомпенсовані, і м'ячик перебуває в спокої. Однак щойно потяг починає набирати швидкість, м'ячик починає



а

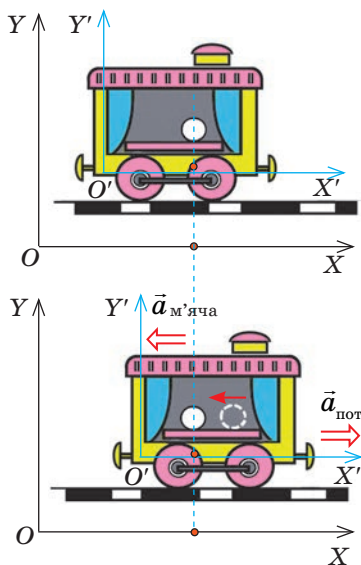


б

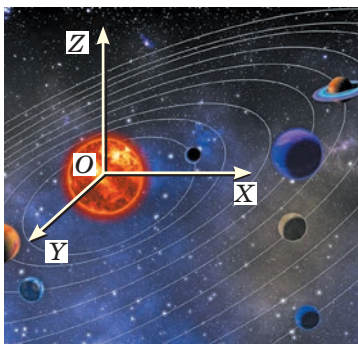
**Рис. 30.1.** Тіла перебувають у стані спокою відносно Землі, оскільки притягання Землі скомпенсовано дією столу (а); дією підвису (б)



**Рис. 30.2.** Парашутист деякий час може рухатися рівномірно прямолінійно, коли дія Землі буде зрівноважена дією повітря та строп парашута



**Рис. 30.3.** Дії на м'яч столика та Землі скомпенсовані. Однак: у системі відліку  $XOY$ , пов'язаній із пероном, м'яч залишається в спокої, тому ця СВ — інерціальна; у системі відліку  $X'O'Y'$ , пов'язаній із потягом, що починає рух, м'яч рухається з прискоренням, тому ця СВ — неінерціальна



**Рис. 30.4.** Геліоцентрична система відліку: початок координат цієї системи розташований у центрі Сонця, а осі напрямлені на далекі зорі

котитися по столу в напрямку, протилежному напрямку руху потяга. Тобто, залишаючись нерухомим відносно перону, м'ячик відносно потяга починає рухатися з прискоренням (рис. 30.3). Отже, відносно СВ, пов'язаної з потягом, який набирає швидкість, явище інерції не спостерігається (дії Землі та столика на м'ячик скомпенсовані, але він не зберігає свою швидкість).

Систему відліку, відносно якої *явище інерції не спостерігається*, називають **неінерціальною системою відліку**.

Систему відліку, відносно якої *спостерігається явище інерції*, називають **інерціальною системою відліку**.

Далі, якщо спеціально не застережено, будемо користуватися тільки інерціальними СВ.

Зазвичай як інерціальну використовують СВ, жорстко пов'язану з точкою на поверхні Землі. Але цю систему можна вважати інерціальною тільки умовно, оскільки Земля обертається навколо своєї осі. Для більш точних вимірювань використовують, наприклад, інерціальну СВ, пов'язану із Сонцем, — *геліоцентричну систему відліку* (рис. 30.4).

Зрозуміло, якщо ми знаємо хоча б одну інерціальну СВ, то можемо знайти багато інших. Адже *будь-яка СВ, що рухається відносно інерціальної СВ рівномірно прямолінійно, теж є інерціальною*.

Наприклад, якщо ви зберігаєте стан спокою або рівномірного прямолінійного руху відносно Землі, то й відносно потяга, який рухається відносно Землі з незмінною швидкістю, ви теж будете рухатися рівномірно прямолінійно (хоча й з іншою швидкістю).

Зазначимо, що в *класичній механіці*\* внаслідок переходу від однієї інерціальної СВ до іншої швидкість руху, переміщення та координата тіла змінюються, а от *сила, маса, прискорення, час руху та відстань між тілами залишаються незмінними*.

\* Класична механіка розглядає рух тіл, швидкість руху яких набагато менша від швидкості поширення світла.

### 3 Формулюємо перший закон Ньютона

Закон інерції І. Галілея став першим кроком у встановленні основних законів класичної механіки. Формулюючи основні закони руху тіл, І. Ньютон назвав цей закон першим законом руху та подав його так: *будь-яке ізольоване тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки й оскільки воно не вимушене прикладеними силами змінити цей стан.*

Звернемо увагу ось на що.

1. Рухається тіло рівномірно, прискорено чи перебуває в стані спокою, залежить від вибору СВ.

2. В інерціальній СВ тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває в стані спокою не лише у випадку, коли воно *ізольоване* (тобто на нього не діють інші тіла), а й у випадку, коли сили, що діють на тіло, *скомпенсовані*.

З огляду на зазначене в сучасній фізиці **перший закон Ньютона** формулюють так:

Існують такі системи відліку, відносно яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на тіло не діють жодні сили або ці сили скомпенсовані.

Отже, *перший закон Ньютона постулює існування інерціальних систем відліку.*

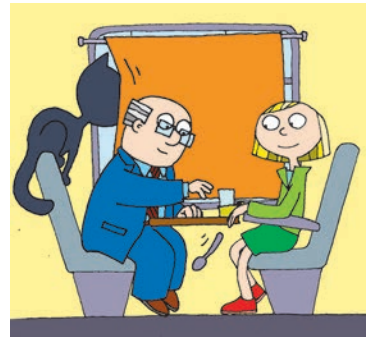
### \* 4 Дізнаємося про принцип відносності Галілея

Спостерігаючи рух тіл у різних інерціальних СВ, І. Галілей дійшов висновку, який отримав назву **принцип відносності Галілея**:

В усіх інерціальних системах відліку перебіг механічних явищ і процесів відбувається однаково за однакових початкових умов.

Галілей писав так: «Якщо ми, перебуваючи в каюті вітрильника, будемо виконувати будь-які експерименти, то ані самі експерименти, ані їхні результати не будуть відрізнятися від тих, що проводилися б на березі. І тільки піднявшись на палубу, ми побачимо: виявляється, наш корабель рухається рівномірно прямолінійно...».

Ви теж можете установити принцип відносності, якщо, наприклад, проведете низку дослідів у вагоні потяга, який рухається рівномірно прямолінійно. Так, чашка, що стоїть на столі, перебуватиме у стані спокою, а якщо впустити ложку, то вона відносно вагона падатиме вертикально вниз (рис. 30.5).



**Рис. 30.5.** Жодними механічними експериментами не можна виявити, рухається вагон рівномірно прямолінійно чи перебуває в стані спокою. Пасажир може це з'ясувати тільки подивившись у вікно



### Підбиваємо підсумки

Тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває в стані спокою лише тоді, коли на нього не діють інші тіла та поля або їхні дії скомпенсовані, — це сучасне формулювання закону інерції, який експериментально встановив Г. Галілей. У сучасній фізиці цей закон називають першим законом Ньютона та формулюють так: існують такі системи відліку, відносно яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на тіло не діють жодні сили або ці сили скомпенсовані. Такі системи відліку називають інерціальними.

Зазвичай як інерціальні використовують СВ, пов'язані із Землею. Будь-яка СВ, що рухається відносно інерціальної СВ рівномірно прямолінійно, теж є інерціальною.



### Контрольні запитання

1. За яких умов тіло зберігає швидкість свого руху? Наведіть приклади.
2. Сформулюйте закон інерції.
3. Які СВ називають інерціальними? неінерціальними? Наведіть приклади таких систем.
4. Сформулюйте перший закон Ньютона. Що він постулює? \*5. Сформулюйте принцип відносності Галілея.



### Вправа № 30

1. Ви сидите на стільці — ви, як і стілець, перебуваєте в стані спокою відносно Землі. Які тіла діють на стілець? на вас? Що можна сказати про ці дії?
2. Веслярі намагаються змусити човен рухатися проти течії, але човен перебуває в спокої відносно берега. Дії яких тіл при цьому компенсуються?
3. Кіт лежить на столі (див. рис. 30.1). Чи буде СВ, пов'язана з котом, інерціальною? Чи буде інерціальною СВ, пов'язана з павучком, що рівномірно опускається на павутинці зі стелі? Чи буде інерціальною СВ, пов'язана з мишеням, яке побачило kota й гальмує свій рух? Відповіді поясніть.
4. На рис. 1 зображено кілька тіл. 1) З яким тілом ви пов'язали б СВ, щоб вона була інерціальною? неінерціальною? Відповідь обґрунтуйте. 2) Якою в даний момент часу буде швидкість руху собаки в СВ, пов'язаній із пішоходом; у СВ, пов'язаній із вантажівкою? 3) Яким буде прискорення руху автомобіля у СВ, пов'язаній із деревом; у СВ, пов'язаній із пішоходом?

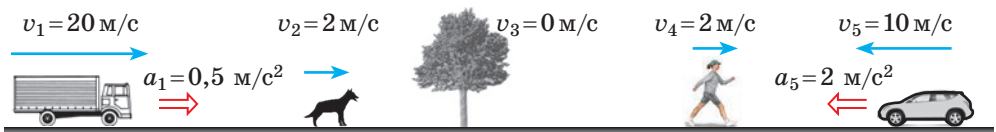


Рис. 1

5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації й дізнайтеся, чому Г. Галілея вважають засновником експериментально-математичного методу.
6. На рис. 2 зображено два тіла та сили, що діють на них (1 клітинка — 1 Н). Знайдіть напрямок і модуль рівнодійної сил, що діють на кожне тіло.



Рис. 2

## § 31. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

У § 30 ви згадали умови, за яких тіло рухається рівномірно прямолінійно. А за яких умов тіло рухається рівноприскорено? Від чого залежить прискорення руху тіла? Відповіді на ці запитання свого часу дав І. Ньютон, сформулювавши *другу аксіому руху*. Про другий закон Ньютона — *основний закон динаміки* — йтиметься в цьому параграфі.

### 1 Формулюємо другий закон Ньютона

Із повсякденного життя ви добре знаєте: тіло швидше змінить швидкість свого руху (набуде більшого прискорення), якщо на нього подіяти з більшою силою. Досліди свідчать: *у скільки разів збільшується сила, у стільки ж разів збільшується прискорення*, якого набуває тіло в результаті дії цієї сили. Тобто прискорення руху тіла прямо пропорційне силі, прикладеній до цього тіла:

$$a \sim F.$$

Якщо *однаковою силою* подіяти на тіла різної маси, то прискорення тіл будуть різними: *чим більшою є маса тіла, тим меншим буде його прискорення*. Наприклад, якщо до тенісного м'яча та до кулі для боулінгу прикласти однакоvu силу, то швидкість руху кулі зміниться менше (або знадобиться більше часу, щоб швидкість руху кулі змінити так само, як і м'яча). Тобто прискорення, набуває тілом унаслідок дії сили, обернено пропорційне масі цього тіла:

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

Зв'язок між силою, що діє на тіло, масою тіла та прискоренням, якого набуває тіло внаслідок дії цієї сили, встановлює **другий закон Ньютона**:

Прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла:

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

### Сила

**Сила**  $\vec{F}$  — векторна фізична величина, яка є мірою дії одного тіла на інше (мірою взаємодії).

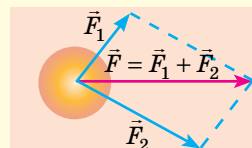
Одиниця сили в СІ — *ньютон*:

$$[F] = 1 \text{ Н.}$$

Сила визначена, якщо відомі її значення (модуль), напрямок і зазначено точку прикладення сили.

$\vec{F}$  значення  
напрямок  
точка прикладення

Якщо на тіло діє декілька сил, то їхню спільну дію можна замінити дією однієї сили — **рівнодійної**  $\vec{F}$ . Рівнодійна дорівнює векторній сумі сил, прикладених до тіла:



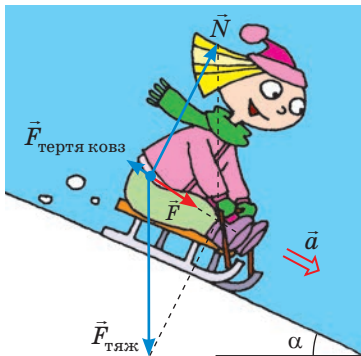
### Маса

**Маса**  $m$  — фізична величина, яка є мірою інертності тіла.

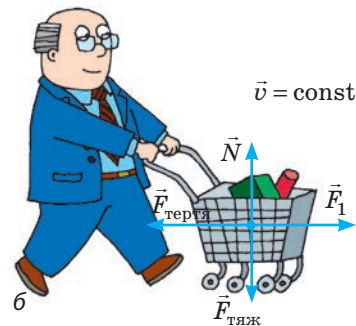
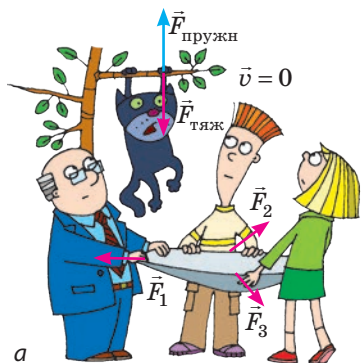
Одиниця маси в СІ — *кілограм*:

$$[m] = 1 \text{ кг.}$$

**Інертність** — властивість тіла, яка полягає в тому, що для зміни швидкості руху тіла внаслідок взаємодії *потрібен час*.



**Рис. 31.1.** Сила  $\vec{F}$  — рівнодійна на сили тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , сили нормальної реакції опори  $\vec{N}$  і сили тертя ковзаня  $\vec{F}_{\text{тертя ковз}}$ . Сила  $\vec{F}$  — причина прискорення  $\vec{a}$  дівчинки



**Рис. 31.2.** Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то тіло перебуває в стані спокою (а) або рухається з незмінною швидкістю (б)

Зазвичай на тіло одночасно діють кілька сил. У такому випадку силу  $\vec{F}$  розуміють як рівнодійну всіх сил, прикладених до тіла:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$  (рис. 31.1), а другий закон Ньютона записують так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}, \text{ або } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$$

Зазначимо, що другий закон Ньютона, записаний у вигляді  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , виконується *тільки в інерціальних системах відліку*.

## 2 Дізнаємося про наслідки з другого закону Ньютона

1. Саме на основі другого закону Ньютона встановлюють одиницю сили в СІ — *ньютон*: 1 Н — це сила, яка, діючи на тіло масою  $m = 1$  кг, надає йому прискорення  $a = 1$  м/с<sup>2</sup>:

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

2. Знаючи модуль і напрямок рівнодійної  $\vec{F}$  сил, які діють на тіло, завжди можна визначити модуль і напрямок прискорення  $\vec{a}$ , якого набуває тіло внаслідок цієї дії:

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

**?** Скориставшись знаннями з математики, обгрунтуйте останнє твердження.

3. Другий закон Ньютона дозволяє визначити **умову рівноприскореного руху тіла**: *тіло рухається рівноприскорено прямолінійно тільки в тому випадку, якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не змінюється з часом*.

4. Якщо рівнодійна дорівнює нулю ( $\vec{F} = 0$ ), тіло не буде змінювати швидкість свого руху ( $\vec{a} = 0$ ) (рис. 31.2). Отже, закон інерції можна сформулювати так: *тіло перебуває у стані спокою або рухається рівномірно прямолінійно, якщо сили, що діють на тіло, скомпенсовані*.



### Підбиваємо підсумки

Другий закон Ньютона — основний закон динаміки: прискорення  $\vec{a}$ , якого набуває тіло внаслідок дії сили  $\vec{F}$ , прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі  $m$  тіла:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

Якщо на тіло одночасно діють кілька сил ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ ), другий закон Ньютона записують так:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}$ , або  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$ .

Тіло рухається рівноприскорено прямолінійно тільки в тому випадку, якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не змінюється з часом.



### Контрольні запитання

1. Від яких чинників залежить прискорення руху тіла?
2. Сформулюйте другий закон Ньютона, запишіть його математичний вираз.
3. Як записати другий закон Ньютона, якщо на тіло діють кілька сил?
4. Що можна сказати про напрямки рівнодійної та прискорення, якого рівнодійна надає тілу?
5. Якою є умова рівноприскореного руху тіла?



### Вправа № 31

1. Потяг масою 5 т рухається з прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Визначте модуль рівнодійної сил, які діють на потяг.
2. Автомобіль рухається прямолінійною ділянкою дороги. Як напрямлена рівнодійна сил, прикладених до автомобіля, якщо він набирає швидкість? сповільнює свій рух?
3. Тіло масою 2 кг, яке рухається на південь, змінює швидкість свого руху внаслідок дії сили 10 Н, напрямленої на схід. Визначте модуль і напрямок прискорення руху тіла.
4. Унаслідок дії сили 15 кН тіло рухається прямолінійно так, що його координата змінюється за законом:  $x = -200 + 9t - 3t^2$ . Визначте масу тіла.
5. На тіло масою 5 кг діють дві взаємно перпендикулярні сили: 12 і 9 Н (рис. 1). Визначте прискорення руху тіла.
6. Скориставшись додатковими джерелами інформації, складіть і розв'яжіть задачу на застосування другого закону Ньютона до руху якогось реального тіла.
7. Хлопчик і дівчинка тягнуть за кінці мотузки (рис. 2). Хто з них почне рухатися? Хто, на вашу думку, набуде більшої швидкості руху? Обґрунтуйте свою відповідь.

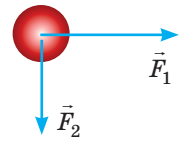


Рис. 1



Рис. 2



### Експериментальне завдання

Скориставшись лінійкою та двома брусками різної маси, доведіть:

- 1) що зі збільшенням сили збільшується й прискорення, якого набуває будь-який брусок під час дії сили;
- 2) якщо на різні бруски діятиме та сама сила, то брусок більшої маси набуде меншого прискорення;
- 3) напрямок прискорення завжди збігається з напрямком дії сили. Опишіть свої дії. Як ви оцінювали прискорення тіл?

## i

## § 32. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Ударте долонею об парту. Боляче? Але чому? Адже це ви били парту, а не парту вас. Потягніть свого товариша за руку, стоячи на гладенькому льоду. Хто зрушить із місця? Обидва? А чому? Адже це ви тягнули товариша, а не товариш вас. Чи зможете ви, вхопившись за волосся, витягти себе з води? Ні? Але чому? Ви ж зможете витягти в такий спосіб із води людину, яка навіть важча за вас. На ці та інші запитання вам допоможе відповісти третій закон Ньютона.



**Рис. 32.1.** Дія завжди є взаємодією. Граючи з м'ячем, ви дієте на нього, наприклад, ногою. М'яч теж діє на ногу (ця дія особливо відчутна, якщо ви граєте босоніж)



**Рис. 32.2.** Дія завжди є взаємодією. Земля притягує до себе Місяць (і Місяць не «відлітає» в космічний простір). Місяць теж притягує Землю (і на Землі спостерігаються припливи та відпливи)

### 1 Установлюємо третій закон Ньютона

Ви вже знаєте, що тіла завжди взаємно діють одне на одне — *взаємодіють* (рис. 32.1, 32.2). Звернемося до досліду та з'ясуємо, як пов'язані сили, з якими тіла діють одне на одне.

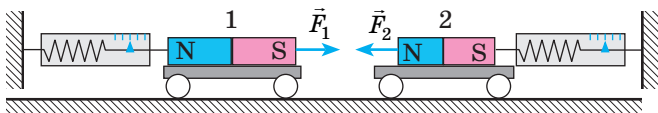
Поставимо на горизонтальну поверхню два однакові легкорухомі візки та за допомогою динамометрів прикріпимо їх до вертикальних стійок. На кожному візку закріпимо магніт, розташувавши їх один до одного різноіменними полюсами. Магніти притягнуться, зсунуть візки та розтягнуть пружини динамометрів. Дослід продемонструє, що покази обох динамометрів будуть однаковими (рис. 32.3).

Можна провести безліч дослідів із вимірювання таких сил, і результат завжди буде однаковим: *сили, з якими взаємодіють два тіла, будуть рівними за модулем і протилежними за напрямком* (рис. 32.4, 32.5).

Взаємодію тіл описує закон взаємодії — **третій закон Ньютона:**

Тіла взаємодіють одне з одним із силами, які напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$



**Рис. 32.3.** Із якою силою магніт 2 притягує магніт 1, із такою ж силою магніт 1 притягує магніт 2:  $F_1 = F_2$ . Сили при цьому мають протилежні напрямки:  $\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2 \downarrow$



## 2 Дізнаємося про деякі особливості взаємодії тіл

Звернувшись до прикладів, наведених на рис. 32.1–32.5, помітимо низку особливостей.

1. Третій закон Ньютона виконується як у випадках безпосереднього контакту тіл (див. рис. 32.1, 32.5), так і у випадках взаємодії тіл на відстані (див. рис. 32.2–32.4).

2. *Сили завжди виникають парами*: якщо є сила  $\vec{F}_1$ , яка діє на тіло 1 з боку тіла 2, то обов'язково є рівна їй за модулем і протилежно напрямлена сила  $\vec{F}_2$ , яка діє на тіло 2 з боку тіла 1. А от прояви цих сил (або однієї з них) не завжди помітні. Наприклад, під час ходьби ви відштовхуєтеся від поверхні Землі, отже, на вас діє сила з боку Землі. Відповідно до третього закону Ньютона, з такою самою силою ви штовхаєте Землю назад. Однак через велику масу Землі результат дії цієї сили непомітний. Якщо ж ви йтимете по легкому човну на воді, то ваша дія на нього змусить човен рухатись у напрямку, протилежному вашому руху.

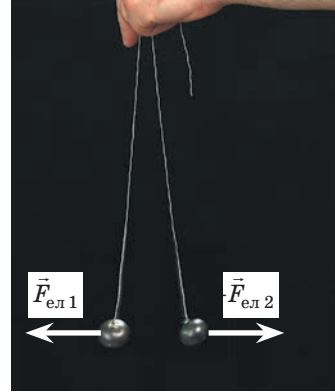
3. Пари сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, завжди *мають одну природу*.

**?** Розгляньте рис. 32.1–32.5 і переконайтесь у слушності останнього твердження.

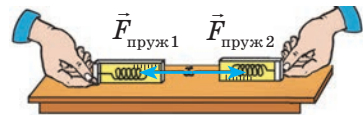
Здавалося б, якщо за будь-якої взаємодії виникає пара рівних за модулем і протилежних за напрямком сил, то такі сили мають зрівноважити одна одну. А це означає те саме, що дії немає. Виходить, ми приречені або на нерухомість, або на безупинний рух? Зрозуміло, що ні! Зрівноважуються тільки сили, прикладені до одного тіла. Сили ж, що виникають під час взаємодії, прикладені до різних тіл, тому вони *не можуть зрівноважити (компенсувати) одна одну*.

## 3 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Посудина з водою зрівноважена на терезах (рис. 32.6). Чи порушиться рівновага терезів, якщо опустити у воду палець, не торкаючись при цьому дна й стінок посудини?

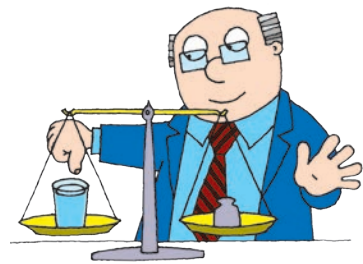


**Рис. 32.4.** На кожну з двох однойменно заряджених кульок діє сила Кулона з боку іншої кульки. Ці сили є рівними за модулем і протилежними за напрямком:  $\vec{F}_{ел1} = -\vec{F}_{ел2}$



**Рис. 32.5.** Якщо динамометри зчепити гачками й потягти в різні боки, то їхні покази будуть однакові:

$$\vec{F}_{пруж1} = -\vec{F}_{пруж2}$$



**Рис. 32.6.** До задачі в § 32

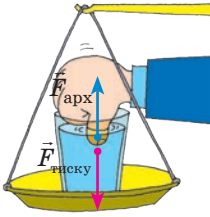


Рис. 32.7. До задачі в § 32

*Розв'язання.* Після занурення у воду на палець почне діяти архімедова сила, напрямлена вертикально вгору. Відповідно до третього закону Ньютона з боку пальця на воду теж почне діяти сила — рівна за модулем архімедовій силі й напрямлена вниз:  $\vec{F}_{\text{тиску}} = -\vec{F}_{\text{арх}}$  (рис. 32.7). Таким чином, палець, навіть не торкаючись дна та стінок посудини, штовхне воду, а разом з нею й посудину вниз — рівновага терезів порушиться.

*Відповідь:* рівновага порушиться.



### Підбиваємо підсумки

Тіла завжди взаємно діють одне на одне — взаємодіють. Взаємодію тіл описує третій закон Ньютона (закон взаємодії): сили, з якими тіла діють одне на одне, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Пари сил, що виникають під час взаємодії, завжди мають одну природу; ці сили не зрівноважують одна одну, тому що прикладені до різних тіл.



### Контрольні запитання

1. Сформулюйте третій закон Ньютона. Чому цей закон називають законом взаємодії? 2. Наведіть приклади прояву третього закону Ньютона. 3. Що можна сказати про природу сил, які виникають під час взаємодії тіл? Наведіть приклади. 4. Чому сили, які виникають під час взаємодії тіл, не зрівноважують одна одну?



### Вправа № 32

- Дівчинка вдарила по м'ячу із силою 10 Н (рис. 1). Із якою силою м'яч «ударив» дівчинку? У якому напрямку діє ця сила?
- Розгляньте гравітаційну взаємодію яблука, що висить на гілці, і Землі (рис. 1). Що сильніше притягується: яблуко до Землі чи Земля до яблука?
- Хлопчик масою 48 кг, стоячи на гладенькому льоду, відштовхнув від себе кулю масою 3 кг, надавши їй у горизонтальному напрямку прискорення  $8 \text{ м/с}^2$ . Якого прискорення набув хлопчик?
- Мотузка витримує натяг не більш ніж 300 Н. Чи порветься мотузка, якщо четверо тягнуть її в протилежні боки так, як показано на рис. 2, силами по 100 Н кожен? Чи порветься мотузка, якщо один її кінець закріпити, а всі четверо тягтимуть її за другий кінець в одному напрямку?
- Подумайте та запишіть 5–10 прикладів взаємодії тіл. Виконайте схематичні рисунки. Укажіть пари сил (як «прихованих», так і явних).

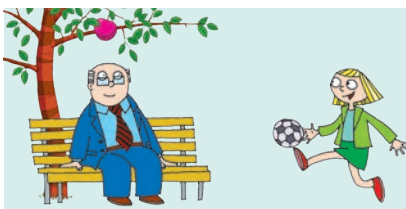


Рис. 1

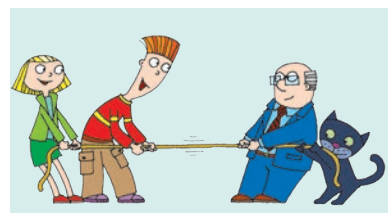


Рис. 2

## § 33. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ. СИЛА ТЯЖІННЯ. ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

Кажуть, що І. Ньютон сам розповідав, як він зробив відкриття закону всесвітнього тяжіння. Якось науковець гуляв яблуневим садом і побачив у денному небі Місяць. У цей момент на його очах з гілки впало яблуко. Саме тоді вчений подумав про те, що, можливо, це одна сила змушує яблуко падати на землю, а Місяць залишатися на навколоземній орбіті.

### 1 Згадуємо гравітаційну взаємодію

Усі без винятку фізичні тіла у Всесвіті притягуються одне до одного — це явище називають **всесвітнім тяжінням** або **гравітацією** (від латин. *gravitas* — вага).

**Гравітаційна взаємодія** — взаємодія, яка є властивою всім тілам у Всесвіті й виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного.

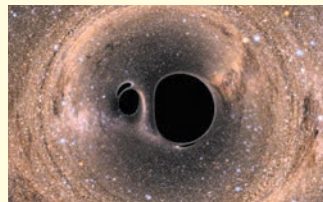
Наприклад, зараз ви і цей підручник взаємодієте силами гравітаційного притягання. Однак у цьому випадку сили настільки малі, що їх не зафіксують навіть найточніші сучасні прилади. Сили гравітаційного притягання сягають помітного значення тільки тоді, коли хоча б одне з тіл має масу, порівнянну з масою небесних тіл (чорних дір, зір, планет і їхніх супутників тощо).

Гравітаційна взаємодія здійснюється завдяки особливому виду матерії — **гравітаційному полю**, яке існує навколо будь-якого тіла: зорі, планети, людини, книжки, молекули, атома тощо.

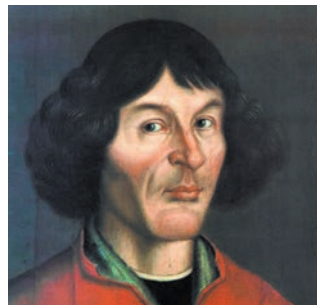
### 2 Відкриваємо закон всесвітнього тяжіння

Перші вислови про тяжіння зустрічаються в античних авторів. Так, давньогрецький мислитель *Плутарх* (бл. 46 — бл. 127 рр.) писав: «Місяць упав би на Землю як камінь, щойно зникла б сила його польоту».

У XVI–XVII ст. учені Європи повернулися до теорії існування взаємного притягання тіл. Поштовхом до її відродження стали насамперед відкриття в астрономії: *Миколай Коперник* (рис. 33.1) довів, що в центрі Сонячної системи



11 лютого 2016 р. було оголошено про експериментальне відкриття гравітаційних хвиль, існування яких передбачив ще *Альберт Ейнштейн*. *Гравітаційна хвиля* — це поширення змінного гравітаційного поля в просторі. Ця хвиля випромінюється рухомою масою і може відірватися від свого джерела (як відривається електромагнітна хвиля від зарядженої частинки, що рухається з прискоренням). Вважають, що вивчення гравітаційних хвиль допоможе пролити світло на історію Всесвіту і не тільки...

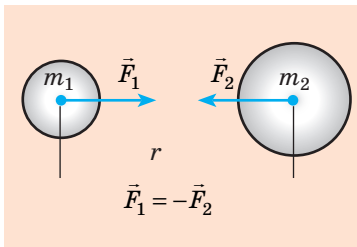


**Рис. 33.1.** Миколай Коперник (1473–1543) — польський астроном, творець геліоцентричної системи світу

розташоване Сонце, а всі планети обертаються навколо нього; *Йоганн Кеплер (1571–1630)* відкрив закони руху планет навколо Сонця; *Галілео Галілей* створив телескоп і за його допомогою побачив супутники Юпітера.

Але чому планети обертаються навколо Сонця, чому супутники обертаються навколо планет, яка сила втримує космічні тіла на орбітах? Одним із перших, хто це зрозумів, був англійський учений *Роберт Гук (1635–1703)*. Він писав: «Усі небесні тіла мають притягання до свого центра, унаслідок чого вони не тільки утримують власні частини й перешкоджають їм розлітатися, але й притягають усі інші небесні тіла, що перебувають у сфері їхньої дії».

Саме Р. Гук висловив припущення про те, що сила притягання двох тіл прямо пропорційна масам цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними. Однак довести це йому не вдалося. Це зробив *І. Ньютон*, який і сформулював **закон всесвітнього тяжіння**:



**Рис. 33.2.** Відповідно до третього закону Ньютона сили гравітаційного притягання тіл рівні за модулем і протилежні за напрямком

Між будь-якими двома тілами діють сили гравітаційного притягання (рис. 33.2), які прямо пропорційні добутку мас цих тіл і обернено пропорційні квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де  $G$  — гравітаційна стала.

**?** Математичний запис якого закону вам нагадує закон всесвітнього тяжіння? Запишіть відповідну формулу.

Гравітаційну сталу вперше виміряв англійський учений *Генрі Кавендіш (рис. 33.3)* у 1798 р. за допомогою крутильних терезів:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

**Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі, з якою дві матеріальні точки масою 1 кг кожна взаємодіють на відстані 1 м одна від одної (якщо  $m_1 = m_2 = 1$  кг, а  $r = 1$  м, то  $F = 6,67 \cdot 10^{-11}$  Н).**

Закон всесвітнього тяжіння дозволяє описати велике коло явищ, у тому числі рух природних і штучних тіл у Сонячній системі, рух подвійних зір, зоряних скупчень тощо. В астрономії, базуючись на цьому законі, обчислюють маси небесних тіл, визначають характер їхнього руху, будову, еволюцію.



**Рис. 33.3.** Генрі Кавендіш (1731–1810) — англійський фізик і хімік. Визначив гравітаційну сталу, масу та середню густину Землі; за кілька років до Ш. Кулона встановив закон взаємодії електричних зарядів

### 3 З'ясуємо межі застосування закону всесвітнього тяжіння

Формула  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  дає точний результат у таких випадках:

1) якщо розміри тіл нехтовно малі порівняно з відстанню між ними (тіла можна вважати матеріальними точками);

2) якщо обидва тіла мають кулясту форму та сферичний розподіл речовини;

3) якщо одне з тіл — куля, розміри та маса якої значно більші, ніж розміри та маса другого тіла, яке перебуває на поверхні цієї кулі або на відстані від неї.

*Зверніть увагу!* Закон всесвітнього тяжіння, як і більшість законів класичної механіки, застосовують тільки у випадках, коли відносна швидкість руху тіл набагато менша від швидкості поширення світла. У загальному випадку тяжіння описується *загальною теорією відносності*, створеною А. Ейнштейном.

**?** Чому можна скористатися законом всесвітнього тяжіння, обчислюючи силу притягання Землі до Сонця? Місяця до Землі? людини до Землі (див. рис. 33.4)?



Рис. 33.4. До завдання в § 33

### 4 Визначаємо силу тяжіння

**Сила тяжіння**  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  — сила, з якою Земля (або інше астрономічне тіло) притягує до себе тіла, що перебувають на її поверхні або поблизу неї (рис. 33.5)\*.

Згідно із законом всесвітнього тяжіння модуль сили тяжіння  $F_{\text{тяж}}$ , яка діє на тіло поблизу Землі, можна обчислити за формулою:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{r^2}, \text{ або } F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де  $G$  — гравітаційна стала;  $m$  — маса тіла;  $M_3$  — маса Землі;  $r = R_3 + h$  — відстань від центра Землі до тіла (рис. 33.6).

\* Сила тяжіння зумовлена не тільки гравітаційним притяганням Землі, а й її добовим обертанням. Проте це є суттєвим лише для надточних розрахунків.

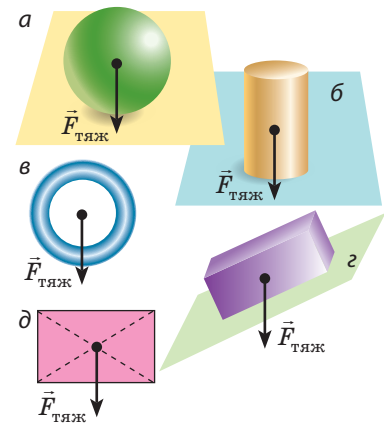


Рис. 33.5. Сила тяжіння напрямлена вертикально вниз і прикладена до точки, яку називають *центром тяжіння тіла*. Центр тяжіння однорідного симетричного тіла розташований у центрі симетрії; може бути й поза тілом (в)

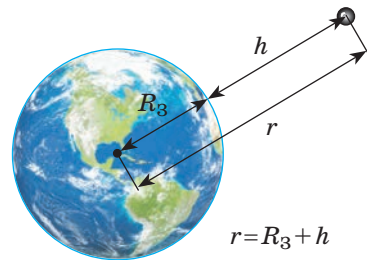
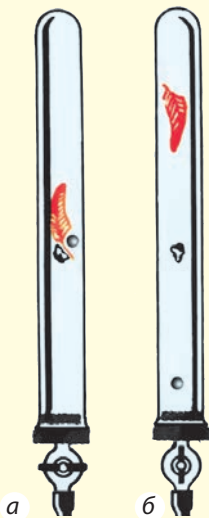


Рис. 33.6. Відстань  $r$  від центра Землі до тіла дорівнює сумі радіуса Землі  $R_3$  і висоти  $h$ , на якій перебуває тіло

Падіння тіл уперше дослідив *Галілео Галілей*, який висунув, а згодом експериментально підтвердив гіпотезу: причиною того, що легкі тіла падають із меншим прискоренням, є опір повітря; в разі відсутності повітря всі тіла — незалежно від їхньої маси, об'єму, форми — падають на Землю з однаковим прискоренням.

Більш точні експерименти здійснив *Ісаак Ньютон*, який виготовив для цього спеціальний пристрій — *трубку Ньютона*. Експерименти показали: у вакуумі свинцева дробинка, корок та пташине перо падали одночасно (а), у повітрі перо безнадійно відставало (б).



## 5 Що таке прискорення вільного падіння

Рух тіла лише під дією сили тяжіння називають **вільним падінням**.

Під час вільного падіння сила тяжіння, що діє на тіло, жодною силою не скомпенсована, тому відповідно до другого закону Ньютона тіло рухається з прискоренням. Це прискорення називають *прискоренням вільного падіння* і позначають символом  $\vec{g}$ :

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{тяж}}}{m}$$

Як і сила тяжіння, прискорення вільного падіння завжди напрямлене вертикально вниз ( $\vec{g} \uparrow \uparrow \vec{F}_{\text{тяж}}$ ) незалежно від того, в якому напрямку рухається тіло. Із формули  $g = F_{\text{тяж}}/m$ :

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

Отже, маємо дві формули для визначення модуля сили тяжіння:

$$F_{\text{тяж}} = mg; F_{\text{тяж}} = G \frac{m \cdot M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Зрівнявши праві частини цих формул, отримаємо формулу для обчислення *прискорення вільного падіння*:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$$

Що показує аналіз останньої формули?

1. *Прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла* (довів Г. Галілей).

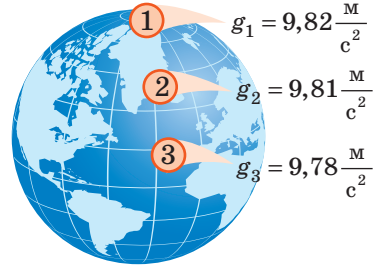
2. *Прискорення вільного падіння зменшується в разі збільшення висоти  $h$  тіла над поверхнею Землі*, причому помітна зміна відбувається, якщо  $h$  становить десятки й сотні кілометрів (на висоті  $h = 100$  км прискорення вільного падіння зменшиться лише на  $0,3$  м/с<sup>2</sup>).

3. Якщо тіло перебуває на поверхні Землі ( $h = 0$ ) або на висоті кількох кілометрів ( $h \ll R_3$ ):

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2} \approx 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

*Зверніть увагу:* розв'язуючи задачі, будемо вважати, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Зазначимо, що через обертання Землі, а також через те, що форма Землі — геоїд (екваторіальний радіус Землі більший за полярний на 21 км), *прискорення вільного падіння залежить від географічної широти місцевості* (рис. 33.7).



**Рис. 33.7.** Модуль прискорення вільного падіння на екваторі є трохи меншим, ніж на полюсі ( $g_3 < g_1$ )

**?** Із курсу фізики 7 класу ви знаєте, що  $g \approx 10 \text{ Н/кг}$ . Доведіть, що  $1 \text{ Н/кг} = 1 \text{ м/с}^2$ .



### Підбиваємо підсумки

Взаємодію, яка є властивою всім тілам у Всесвіті й виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного, називають гравітаційною. Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою особливого виду матерії — гравітаційного поля.

Закон всесвітнього тяжіння: між будь-якими двома тілами діє сила гравітаційного притягання, яка прямо пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ , де  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравітаційна стала.

Силу, з якою Земля притягує до себе тіла, що перебувають на її поверхні або поблизу неї, називають силою тяжіння. Сила тяжіння направлена вертикально вниз, прикладена до центра тяжіння тіла, а її модуль обчислюють за формулами:  $F_{\text{тяж}} = mg$ ;  $F_{\text{тяж}} = G \frac{m \cdot M_3}{(R+h)^2}$ .

Рух тіл тільки під дією сили тяжіння називають вільним падінням, а прискорення, з яким при цьому рухаються тіла, — прискоренням вільного падіння  $\vec{g}$ . Це прискорення завжди направлене вертикально вниз і не залежить від маси тіла. На поверхні Землі  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .



### Контрольні запитання

1. Яку взаємодію називають гравітаційною? Наведіть приклади.
2. Сформулюйте та запишіть закон всесвітнього тяжіння.
3. Яким є фізичний зміст гравітаційної сталої? Чому вона дорівнює?
4. Якими є межі застосування закону всесвітнього тяжіння?
5. Дайте означення сили тяжіння. За якими формулами її обчислюють і як вона направлена?
6. Від яких чинників залежить прискорення вільного падіння?



### Вправа № 33

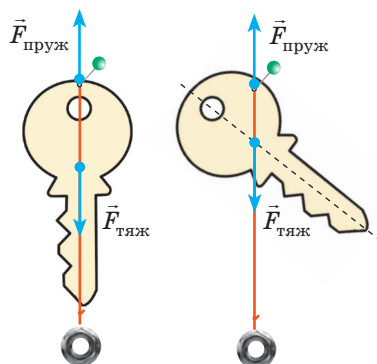
1. Визначте масу тіла, якщо на поверхні Місяця на нього діє сила тяжіння 7,52 Н. Яка сила тяжіння діятиме на це тіло на поверхні Землі? Прискорення вільного падіння на Місяці —  $1,6 \text{ м/с}^2$ .

2. Чи можна, скориставшись законом всесвітнього тяжіння, розрахувати силу притягання двох океанських лайнерів (див. рисунок)?
3. Як зміниться сила гравітаційного притягання між двома кульками, якщо одну з них замінити іншою, вдвічі більшої маси?
4. Вимірявши гравітаційну сталу, Г. Кавендіш зміг визначити масу Землі, після чого з гордістю сказав: «Я зважив Землю». Визначте масу Землі, знаючи її радіус ( $R_3 \approx 6400$  км), прискорення вільного падіння на її поверхні та гравітаційну сталу.
5. Визначте прискорення вільного падіння на висоті, яка дорівнює трьом радіусам Землі.
6. Визначте гравітаційне прискорення на поверхні планети, маса якої вдвічі більша від маси Землі, а радіус вдвічі більший за радіус Землі.
7. Скористайтесь додатковими джерелами інформації і дізнайтесь про прискорення вільного падіння на поверхні планет Сонячної системи. На якій планеті ви будете менше важити? Чи буде при цьому більшою ваша маса?
8. Рівняння руху тіла:  $x = -5t + 5t^2$ . Якими є початкова швидкість і прискорення руху тіла? Через який інтервал часу тіло змінить напрямок свого руху?



### Експериментальне завдання

Якщо тіло не має правильної геометричної форми, то центр його тяжіння можна визначити, підвішуючи тіло по черзі за будь-які дві крайні точки (див. рисунок). Виріжте із цупкого паперу або картону фігурку довільної форми та визначте розташування її центра тяжіння. Помістіть фігурку центром тяжіння на вістря голки або стрижня авто-ручки. Переконайтеся, що фігурка перебуває в рівновазі. Запишіть план проведення експерименту.



## Фізика і техніка в Україні

**Одеський національний політехнічний університет**, заснований у 1918 р., сьогодні є одним із провідних технічних навчальних закладів України.

Престиж університету визначається авторитетом видатних учених, життя яких пов'язане з Одеською політехнікою і серед яких багато науковців зі світовим ім'ям.

Період становлення Одеської політехніки відомий іменами таких учених, як лауреат Нобелівської премії І. Є. Тамм, академіки Л. І. Мандельштам, М. Д. Папалексі, А. Г. Амелін, М. А. Аганін, професори М. А. Кузнецов, К. С. Заврієв, Ч. Д. Кларк, І. Ю. Тимченко та ін.

В Одеському політехнічному університеті навчалися і працювали видатні інженери, конструктори, вчені, винахідники: В. І. Атрощенко, Г. К. Боресков, А. А. Еннан, О. Е. Нудельман, О. Ф. Дащенко, Л. І. Гутенмахер, Г. К. Сулов, В. В. Ажогін, Л. І. Панов, Б. С. Прістер, А. В. Усов, О. В. Якимов та ін.

Основні напрями наукових досліджень і підготовки кадрів Одеської політехніки — машинобудування, енергетика, хімічні технології, комп'ютерно-інтегровані системи управління, радіоелектроніка, електромеханіка, інформаційні технології, телекомунікації.

Із 2010 р. ректор університету — *Геннадій Олександрович Оборський*, доктор технічних наук, професор, відомий фахівець у галузі динаміки й надійності технологічних систем.



## § 34. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Траєкторія руху м'яча, кинутого вертикально вгору або вниз, — пряма. Розбігшись, людина стрибає у воду — траєкторією руху людини буде вітка параболи. Ядро, випущене під кутом до горизонту, теж опише частину параболи. Рухи всіх цих тіл відбуваються *тільки* під дією сили тяжіння, тобто маємо справу з вільним падінням. Чому ж ці рухи так відрізняються? Причина — в різних початкових умовах (рис. 34.1).

### 1 Здійснюємо ряд спрощень

Характер реального руху тіла в полі тяжіння Землі є досить складним, і його описування виходить за межі шкільної програми. Тому приймемо низку спрощень:

1) систему відліку, пов'язану з точкою на поверхні Землі, вважатимемо інерціальною;

2) розглядатимемо переміщення тіл поблизу поверхні Землі, тобто на невеликій (порівняно з її радіусом) відстані. Тоді кривизною поверхні Землі та зміною прискорення вільного падіння можна знехтувати; інакше кажучи, Землю будемо вважати «пласкою», а прискорення вільного падіння — незмінним:

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

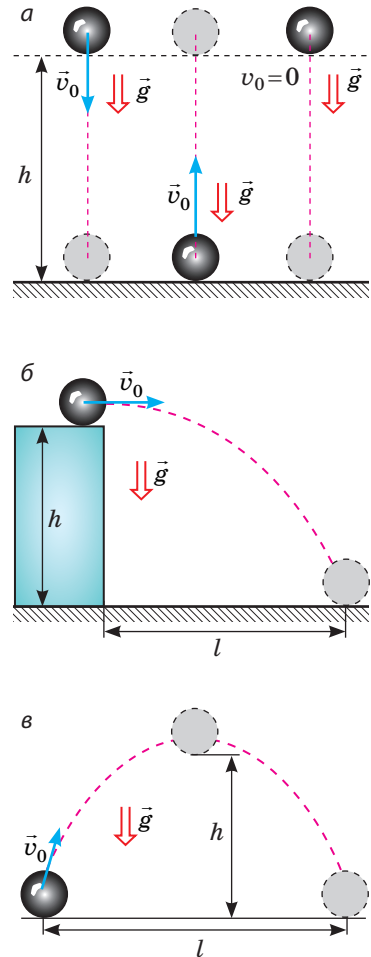
3) опором повітря будемо нехтувати.

*Зверніть увагу:* якщо прийняти тільки перші два спрощення, отриманий результат буде дуже близьким до реального; останнє ж спрощення не дає серйозної похибки тільки у випадках, коли *тіла важкі, невеликі за розмірами, а швидкість їхнього руху досить мала*. Саме такі тіла ми розглядатимемо далі.

### 2 Вивчаємо рух тіла, кинутого вертикально

Спостерігаючи за рухом невеликих важких тіл, які кинуті вертикально вниз, вертикально вгору або падають без початкової швидкості, бачимо, що траєкторія руху таких тіл — відрізки прямої (див. рис. 34.1, *a*). До того ж ми знаємо, що ці тіла рухаються з незмінним прискоренням.

Рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз, — це рівноприскорений прямолінійний рух із прискоренням, що дорівнює прискоренню вільного падіння:  $\vec{a} = \vec{g}$ .



**Рис. 34.1.** Траєкторія руху тіла під дією сили тяжіння залежить від напрямку швидкості руху тіла: тіло, кинуте вертикально, рухається прямолінійною траєкторією (*a*); траєкторія руху тіла, кинутого горизонтально (*b*) або під кутом до горизонту (*v*), — парабола

Щоб математично описати рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз (вільне падіння тіла), скористаємося формулами залежності швидкості, переміщення та координати від часу для рівноприскореного прямолінійного руху.

Підійдемо до запису формул, які описують вільне падіння, «технічно».

1. Описуючи рух тіла по вертикалі, вектори швидкості, прискорення та переміщення традиційно проєктують на вісь  $OY$ , тому в рівняннях руху *замінімо  $x$  на  $y$* .

2. Переміщення тіла по вертикалі зазвичай позначають символом  $h$  (висота), тому *замінімо  $s$  на  $h$* .

3. Для всіх тіл, які рухаються тільки під дією сили тяжіння, прискорення дорівнює прискоренню вільного падіння, тому *замінімо  $a$  на  $g$* .

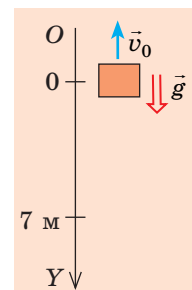
З огляду на зазначені заміни отримаємо рівняння, якими описують рух тіла, що вільно падає:

Назва формули	Рівноприскорений рух уздовж осі $OX$	Вільне падіння уздовж осі $OY$
Рівняння залежності проєкції швидкості від часу	$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Рівняння залежності проєкції переміщення від часу	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$s_y = h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
Формула, яка виражає геометричний зміст переміщення	$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot t$	$s_y = h_y = \frac{v_y + v_{0y}}{2} \cdot t$
Формула для розрахунку проєкції переміщення, якщо невідомий час руху тіла	$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	$s_y = h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$
Рівняння координати	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$	$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y}{2} t^2$

**Задача 1.** Повітряна куля рівномірно піднімається зі швидкістю 2 м/с. На висоті 7 м від поверхні землі з неї впало невелике важке тіло. Через який інтервал часу це тіло впаде на землю? Якою буде швидкість руху тіла в момент падіння? Падіння тіла вважайте вільним.

*Аналіз фізичної проблеми.* Виконаємо пояснювальний рисунок. Спрямуємо вісь  $OY$  вертикально вниз. Початок координат нехай збігається з положенням тіла в момент початку падіння.

Тіло впало з кулі, що рівномірно піднімалася, тому в момент початку падіння швидкість руху тіла дорівнювала швидкості руху кулі й була напрямлена вертикально вгору.



**Дано:**

$v_0 = 2 \text{ м/с}$

$h = 7 \text{ м}$

$g = 10 \text{ м/с}^2$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Для обчислення часу падіння скористаємося рівнянням пе-

реміщення:  $h_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$ .

**Знайти:**

$t$  — ?

$v$  — ?

Конкретизуємо рівняння (перейдемо від проекцій до модулів). Із рисунка бачимо:  $h_y = h = 7 \text{ м}$ ;  $v_{0y} = -v_0 = -2 \text{ м/с}$ ;  $g_y = g = 10 \text{ м/с}^2$ . Підставимо ці дані в рівняння переміщення:  $7 = -2t + 5t^2 \Rightarrow 5t^2 - 2t - 7 = 0$ .Розв'язавши одержане рівняння, визначимо  $t$ :

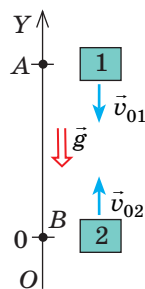
$$D = 4 + 4 \cdot 5 \cdot 7 = 144; t_1 = \frac{2+12}{10} = 1,4 \text{ (с)}; t_2 = \frac{2-12}{10} = -1 \text{ (с)} \text{ — сторонній корінь.}$$

Швидкість руху в момент падіння визначимо за формулою  $v_y = v_{0y} + g_y t$ .Ураховуючи, що  $v_{0y} = -v_0 = -2 \text{ м/с}$ ;  $g_y = g = 10 \text{ м/с}^2$ , маємо:  $v_y = -2 + 10t$ .Оскільки час падіння  $t = 1,4 \text{ с}$ , то  $v_y = -2 + 10 \cdot 1,4 = 12 \text{ (м/с)}$ .**Відповідь:**  $t = 1,4 \text{ с}$ ;  $v = 12 \text{ м/с}$ .

**Задача 2.** Із точок  $A$  і  $B$ , розташованих на одній вертикалі на відстані  $105 \text{ м}$  одна від одної (див. рисунок), кидають два тіла з однакою швидкістю  $10 \text{ м/с}$ . Тіло 1 кидають із точки  $A$  вертикально вниз, а через  $1 \text{ с}$  із точки  $B$  кидають вертикально вгору тіло 2. На якій відстані від точки  $A$  тіла зустрінуться?

**Аналіз фізичної проблеми.** Обидва тіла рухаються прямолінійно з прискоренням  $\vec{a} = \vec{g}$ . У момент зустрічі координати тіл будуть однакові:  $y_1 = y_2$ . Отже, для розв'язання задачі слід записати рівняння координати для кожного тіла.

Домовимося, що початок координат збігається з положенням тіла 2 ( $y_{02} = 0$ ), тоді початкова координата тіла 1 —  $105 \text{ м}$  ( $y_{01} = 105 \text{ м}$ ). Час руху тіла 2 на  $1$  секунду менший від часу руху тіла 1, тобто  $t_2 = t_1 - 1 \text{ с}$ .



**Пошук математичної моделі, розв'язання.** Запишемо рівняння координати в загальному вигляді та конкретизуємо його для кожного тіла:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2} t^2.$$

Тіло 1

$y_{01} = 105 \text{ м}; v_{01y} = -v_{01} = -10 \text{ м/с};$

 $g_y = -g = -10 \text{ м/с}^2$  (початкова швидкість і прискорення напрямлені протилежно напрямку осі  $OY$ ). Отже:

$$y_1 = 105 - 10t_1 - 5t_1^2.$$

Тіло 2

$y_{02} = 0; v_{02y} = v_{02} = 10 \text{ м/с}; g_y = -g =$

 $= -10 \text{ м/с}^2$  (швидкість напрямлена в напрямку осі  $OY$ , прискорення — протилежно напрямку осі  $OY$ ). Отже:

$$y_2 = 0 + 10t_2 - 5t_2^2.$$

Зважаючи на те що  $y_1 = y_2$ , а  $t_2 = t_1 - 1$ , маємо:

$$105 - 10t_1 - 5t_1^2 = 10(t_1 - 1) - 5(t_1 - 1)^2.$$

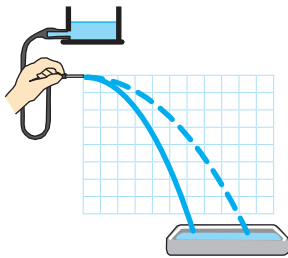
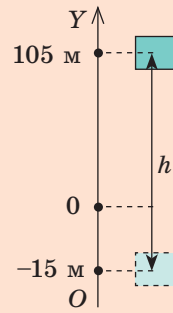
**?** Доведіть, що після розкриття дужок і зведення подібних доданків отримаємо рівняння  $30t_1 = 120$ .

Отже,  $t_1 = 4$  с — час зустрічі. Через 4 с тіло 1 опиниться в точці з координатою

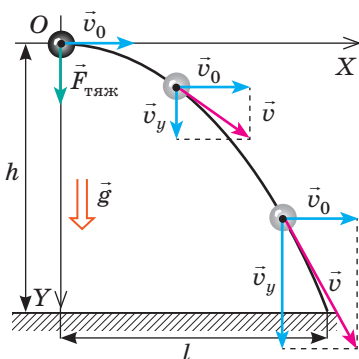
$$y_1 = 105 - 10 \cdot 4 - 5 \cdot 4^2 = -15 \text{ (м)}.$$

Таким чином, тіла зустрінуться на відстані  $h = 105 + 15 = 120$  (м) від точки А (див. рисунок).

**Відповідь:**  $h = 120$  м.



**Рис. 34.2.** Горизонтально спрямований струмінь води має форму параболи, вигляд якої залежить від початкової швидкості руху частинок води



**Рис. 34.3.** Рух тіла, кинутого горизонтально, складається з двох рухів: рівномірного — уздовж осі  $OX$  зі швидкістю  $\vec{v}_0$ ; рівноприскореного — уздовж осі  $OY$  без початкової швидкості та з прискоренням  $\vec{g}$

### 3 Розглядаємо рух тіла, кинутого горизонтально

Якщо за допомогою гумової трубки з наконечником створити струмінь води і спрямувати його горизонтально, побачимо, що траєкторія руху частинок води — парабола (рис. 34.2). Параболою буде й траєкторія руху м'ячика для пінг-понгу, якщо йому надати горизонтальної швидкості, й траєкторія кинутого горизонтально камінця тощо.

Розглянемо рух тіла, кинутого горизонтально, як результат додавання *двох рухів* (рис. 34.3):

1) *рівномірного* — уздовж осі  $OX$ , оскільки на тіло вздовж цієї осі не діє жодна сила (проекція сили тяжіння на вісь  $OX$  дорівнює нулю);  
2) *рівноприскореного* (з прискоренням  $\vec{g}$ ) — уздовж осі  $OY$ , оскільки уздовж осі  $OY$  на тіло діє сила тяжіння.

Уздовж осі  $OX$  тіло рухається рівномірно, тому швидкість  $v_x$  руху тіла є незмінною і дорівнює початковій швидкості  $v_0$ , а дальність  $l$  польоту тіла за час  $t$  дорівнює добутку початкової швидкості  $v_0$  і часу  $t$  руху тіла:

$$v_x = v_0; \quad l = v_0 t$$

Уздовж осі  $OY$  тіло вільно падає, тому швидкість його руху та висоту падіння визначимо за формулами:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Із рис. 34.3 бачимо:  $v_{0y} = 0$ ;  $g_y = g$ ;  $h_y = h$ , тому

$$v_y = g t; \quad h = \frac{g t^2}{2}$$

Модуль швидкості руху тіла в довільній точці траєкторії обчислимо, скориставшись теоремою Піфагора:  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  (рис. 34.4).

Оскільки  $v_x = v_0$ , а  $v_y = gt$ , маємо:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$$

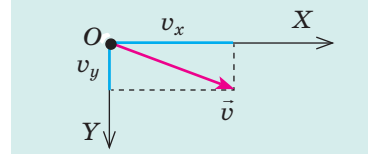


Рис. 34.4. До визначення модуля швидкості руху тіла

**Задача 3.** Із прямовисної скелі заввишки 20 м у море горизонтально кинули камінь. Із якою швидкістю кинули камінь, якщо він упав у воду на відстані 16 м від скелі? Яка швидкість руху каменя в момент падіння в море? Опором повітря знехтуйте.

*Аналіз фізичної проблеми.* Початкова швидкість руху каменя напрямлена горизонтально. Камінь вільно падає. Отже, рух тіла вздовж осі  $OX$  — рівномірний, а вздовж осі  $OY$  — рівноприскорений, без початкової швидкості, з прискоренням  $\vec{g}$ .

Дано:

$$h = 20 \text{ м}$$

$$l = 16 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

Знайти:

$$v_0 \text{ — ?}$$

$$v \text{ — ?}$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Із формули  $h = \frac{gt^2}{2}$  визначимо час падіння:  $t^2 = \frac{2h}{g} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ .

Знаючи час і дальність польоту каменя, обчислимо початкову швидкість його руху та швидкість у момент падіння:

$$l = v_0 t \Rightarrow v_0 = \frac{l}{t}; \quad v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[t] = \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{10}} = 2 \text{ (с)}; \quad v_0 = \frac{16 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 8 \text{ м/с};$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad v = \sqrt{8^2 + 10^2 \cdot 2^2} = \sqrt{64 + 400} \approx 22 \text{ (м/с)}.$$

Відповідь:  $v_0 = 8 \text{ м/с}; \quad v \approx 22 \text{ м/с}$ .



### Контрольні запитання

1. Які спрощення ми приймаємо, розв'язуючи задачі на рух тіл під дією сили тяжіння? 2. Запишіть рівняння руху тіла під дією сили тяжіння в загальному вигляді. 3. Якою є траєкторія руху тіла, кинутого вертикально? горизонтально? 4. Як для тіла, кинутого горизонтально, визначити дальність польоту? висоту падіння? модуль швидкості руху тіла в будь-якій точці траєкторії?



### Вправа № 34

*Виконуючи завдання, вважайте, що опір повітря відсутній.*

- Одне тіло кинули вертикально вгору, друге — вертикально вниз, третє відпустили. Яке тіло рухається з найбільшим прискоренням?
- Тіло рухається тільки під дією сили тяжіння. Систему координат обрано так, що вісь  $OX$  напрямлена горизонтально, вісь  $OY$  — вертикально вгору. Опишіть, виконавши відповідний рисунок, характер руху тіла, якщо: а)  $v_{0x} > 0, v_{0y} = 0$ ; б)  $v_{0x} = 0, v_{0y} > 0$ ; в)  $v_{0x} = 0, v_{0y} < 0$ .

- М'яч кинули з поверхні землі вертикально вгору з початковою швидкістю 20 м/с. Визначте: а) швидкість руху та переміщення м'яча через 3 с після початку руху; б) час підйому та максимальну висоту підйому м'яча.
- Із даху будинку на висоті 45 м випущено горизонтально стрілу з початковою швидкістю 20 м/с. Через який інтервал часу стріла впаде на землю? Якими будуть дальність польоту та переміщення стріли?
- Дві кульки розміщено на одній вертикалі на відстані 10 м одна від одної. Одночасно верхню кульку кидають вертикально вниз із початковою швидкістю 25 м/с, а нижню просто відпускають. Через який час кульки зіткнуться?
- На рисунку зазначено положення кульки через кожну 0,1 с руху. Визначте прискорення вільного падіння кульки, якщо сторона кожного квадрата сітки — 5 см.
- Від бурульки на даху відірвалася краплина. Який шлях подолає краплина за четверту секунду після моменту відриву?
- Скориставшись даними задачі 2, розглянутої в пункті 2 § 34, визначте шлях, який пододало кожне тіло до зустрічі.



- Установіть відповідність між силою і формулою для її визначення.

1 Сила тяжіння      2 Сила Архімеда      3 Сила тертя      4 Сила пружності  
 А  $F = mg$       Б  $F = kx$       В  $F = \mu N$       Г  $F = pS$       Д  $F = \rho gV$



### Експериментальне завдання

Покладіть на край столу невелике важке тіло та штовхніть його. Спробуйте визначити швидкість, надану тілу, скориставшись лише лінійкою. Запишіть, як ви це зробили.

## Фізика і техніка в Україні



**Абрам Федорович Йоффе** (1880–1960) — видатний український радянський фізик, академік, науковий організатор, що увійшов в історію як «батько радянської фізики», «тато Йоффе».

Основні наукові досягнення А. Ф. Йоффе пов'язані з вивченням електричних, фотоелектричних і механічних властивостей кристалів. Він першим висунув гіпотезу про те, що напівпровідники можуть забезпечити ефективне перетворення енергії випромінювання на електричну енергію (за цим принципом сьогодні розвивається сонячна енергетика). Паралельно з Р. Міллікеном учений вперше визначив заряд електрона. Ініціював створення

фізико-технічних інститутів, зокрема в Харкові та Дніпрі, створив всесвітньо відому наукову школу.

Під керівництвом А. Ф. Йоффе працювали майбутні Нобелівські лауреати П. Л. Капиця, М. М. Семенов, Л. Д. Ландау, І. Є. Тамм, а також видатні вчені, які зробили значний внесок у світову науку: А. І. Аліханов, Л. А. Арцимович, М. П. Бронштейн, Я. Б. Зельдович, І. К. Кікоїн, Б. П. Константинов, І. В. Курчатов, Ю. Б. Харитон і багато інших.

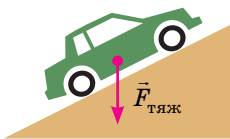

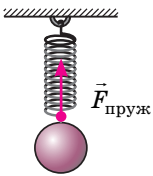
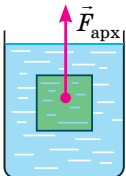
У 1960 р. ім'я А. Ф. Йоффе присвоєно Фізико-технічному інституту в Ленінграді (зараз Санкт-Петербург), на честь ученого також названо кратер на Місяці, малу планету Сонячної системи 5222, вулицю в Берліні (Німеччина).

## § 35. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ КІЛЬКОХ СИЛ

Вивчаючи цей параграф, ви ознайомитеся з основними етапами розв'язання задач із динаміки, розглянете приклади розв'язання деяких ключових задач. Матеріал параграфа слід ретельно опрацювати, адже з подібними задачами ви будете зустрічатися в ході вивчення всього подальшого курсу фізики.

### 1 Згадуємо сили

З огляду на тему параграфа перш за все слід згадати означення деяких сил, з якими ви ознайомилися в курсі механіки 7 класу, формули для їх визначення, а також напрямок їхньої дії.

Сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$	Сила тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тертя}}$	Сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$	Сила Архімеда $\vec{F}_{\text{арх}}$
сила, з якою Земля притягує до себе тіла, що перебувають на її поверхні або поблизу неї	сила, яка виникає внаслідок ковзання одного тіла по поверхні іншого	сила, яка виникає під час деформації тіла	виштовхувальна сила, яка діє на тіло, занурене в рідину або газ
$F_{\text{тяж}} = mg$	$F_{\text{тертя}} = \mu N$	$F_{\text{пруж}} = kx$	$F_{\text{арх}} = \rho_{\text{рід(газу)}} g V_{\text{зан}}$
напрявлена вертикально вниз і прикладена до центра тяжіння тіла	напрявлена проти руху тіла і діє вздовж поверхні дотику тіл	напрявлена протилежно видовженню і діє вздовж шнура або пружини	напрявлена вертикально вгору і прикладена до центра зануреної частини тіла
			

### 2 Учимося розв'язувати задачі

#### Алгоритм розв'язування задач із динаміки

1. Уважно прочитайте умову задачі. З'ясуйте, які сили діють на тіло, яким є характер його руху (рухається це тіло з прискоренням чи рівномірно прямолінійно).
2. Запишіть коротку умову задачі. У разі необхідності переведіть значення фізичних величин в одиниці СІ.
3. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому зазначте сили, що діють на тіло, і напрямок прискорення руху тіла.

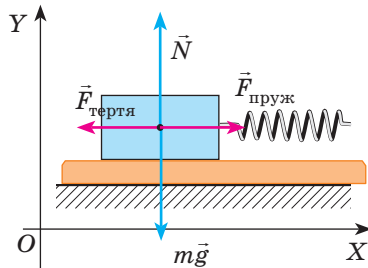
4. Виберіть інерціальну систему відліку. Осі координат бажано спрямувати так, щоб якнайбільше сил було направлено вздовж цих осей (це не змінить результату розв'язання, але значно його спростить).
5. Запишіть рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проєкціях на осі координат. Запишіть формули для обчислення сил. Одержавши систему рівнянь, розв'яжіть її відносно невідомої величини. Якщо в задачі є додаткові умови, використайте їх.
6. Перевірте одиницю та знайдіть числове значення шуканої величини. Проаналізуйте результат, запишіть відповідь.

Під час розв'язування задач систему відліку будемо пов'язувати з точкою, нерухомою відносно поверхні Землі (тобто тіло рухається, а осі координат залишаються нерухомими); тіло вважатимемо матеріальною точкою, тому всі сили будемо зображати прикладеними до однієї точки.

**Задача 1.** Дерев'яний брусок масою 200 г рівномірно тягнуть горизонтальною поверхнею за допомогою пружини жорсткістю 40 Н/м. Визначте видовження пружини, якщо коефіцієнт тертя ковзання 0,25.

*Аналіз фізичної проблеми.* Щоб визначити видовження пружини, слід знати силу пружності, яку знайдемо, скориставшись другим законом Ньютона. Слід урахувати, що брусок тягнуть рівномірно, тому прискорення його руху дорівнює нулю.

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зобразимо сили, що діють на тіло, і напрямки осей координат.



*Дано:*

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

$$k = 40 \text{ Н/м}$$

$$\mu = 0,25$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

*Знайти:*

$x$  — ?

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Запишемо другий закон Ньютона у векторному вигляді:  $m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тертя}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{пруж}} = 0$ .

Знайдемо проєкції сил на осі  $OX$  і  $OY$ , запишемо формули для обчислення сили пружності та сили тертя ковзання:

$$\begin{cases} OX: -F_{\text{тертя}} + F_{\text{пруж}} = 0 \text{ (оскільки } mg_x = 0, N_x = 0), \\ OY: N - mg = 0 \text{ (оскільки } F_{\text{тертя}y} = 0, F_{\text{пруж}y} = 0), \\ F_{\text{тертя}} = \mu N, \\ F_{\text{пруж}} = kx. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, знайдемо  $x$ :

$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тертя}} = \mu mg; F_{\text{пруж}} = F_{\text{тертя}} \Rightarrow kx = \mu mg \Rightarrow x = \frac{\mu mg}{k}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[x] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н}}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; x = \frac{0,25 \cdot 0,2 \cdot 10}{40} = 0,0125 \text{ (м)}.$$

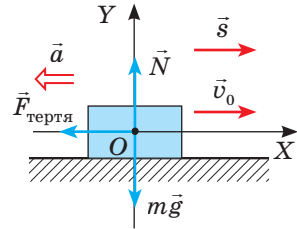
*Відповідь:*  $x = 12,5 \text{ мм}$ .



**Задача 2.** Обчисліть гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, якщо він рухався прямою горизонтальною ділянкою дороги й перед початком гальмування мав швидкість 54 км/год. Коефіцієнт тертя ковзання гуми по бетону — 0,75.

*Аналіз фізичної проблеми.* Щоб визначити гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, необхідно знати прискорення його руху. Прискорення знайдемо, скориставшись другим законом Ньютона.

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зазначимо сили, що діють на автомобіль, напрямки осей координат, початкової швидкості, переміщення та прискорення (автомобіль зупиняється, тому кінцева швидкість його руху дорівнює нулю, а напрямок прискорення протилежний напрямку руху).



Дано:

$$v_0 = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с}$$

$$\mu = 0,75$$

$$v = 0$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

Знайти:

$$s - ?$$

$$t - ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Згідно з другим законом Ньютона:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тертя}} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

Знайдемо проекції сил і прискорення на осі  $OX$  і  $OY$ , запишемо формулу для обчислення сили тертя ковзання:

$$\begin{cases} OX: -F_{\text{тертя}} = -ma \text{ (оскільки } mg_x = 0, N_x = 0), \\ OY: N - mg = 0 \text{ (оскільки } F_{\text{тертя}y} = 0, a_y = 0), \\ F_{\text{тертя}} = \mu N. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, знайдемо  $a$ :

$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тертя}} = \mu mg \Rightarrow \mu mg = ma \Rightarrow a = \mu g.$$

Гальмівний шлях і час руху визначимо, скориставшись формулами:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}; \quad v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Урахувавши, що  $v_x = 0$ ;  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = -a$ ;  $s_x = s$ , маємо:  $s = \frac{v_0^2}{2a}$ ;  $0 = v_0 - at$ .

Отже,  $v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}$ . З огляду на те що  $a = \mu g$ , остаточно отримуємо:

$$s = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \quad t = \frac{v_0}{\mu g}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[s] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \text{м}, \quad s = \frac{15^2}{15} = 15 \text{ (м)}; \quad [t] = \frac{\text{м}/\text{с}}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{с}, \quad t = \frac{15}{7,5} = 2 \text{ (с)}.$$

*Аналіз результатів.* Отримано реальний результат, адже гальмівний шлях автомобіля дійсно досить великий. Пам'ятайте про це і ніколи не порушуйте правил дорожнього руху!

**Відповідь:**  $s = 15 \text{ м}$ ;  $t = 2 \text{ с}$ .

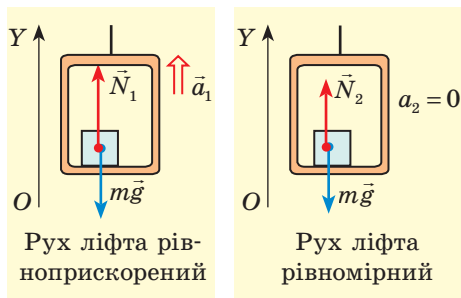
**Задача 3.** Людина масою 70 кг зайшла в ліфт. Ліфт починає рух із прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$ , напрямленим угору, а потім піднімається з незмінною швидкістю. На скільки змінюється вага людини під час цього руху?

*Аналіз фізичної проблеми*

Вага тіла — це сила, яка діє на опору — ліфт. Виявити всі сили, які діють на ліфт, досить складно. Але за третім законом Ньютона  $P = N$  (з якою силою тіло діє на опору, з такою самою силою опора діє на тіло).

Отже, нам слід визначити силу нормальної реакції опори, яка діє на людину під час кожного виду руху ліфта.

Виконаємо пояснювальні рисунки, на яких зазначимо сили, що діють на людину, напрямком прискорення і напрямком осі  $OY$ .

*Дано:*

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$a_1 = 0,2 \text{ м/с}^2$$

$$a_2 = 0$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

*Знайти:*

$$P_1 - P_2 \text{ — ?}$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Запишемо другий закон Ньютона для кожного випадку та знайдемо проекції сил і прискорення на вісь  $OY$ .

1. Рух рівноприскорений:  $\vec{N}_1 + m\vec{g} = m\vec{a}_1$ ;

$OY$ :  $N_1 - mg = ma_1 \Rightarrow N_1 = ma_1 + mg = m(a_1 + g)$ .

Отже,  $P_1 = m(a_1 + g)$ .

2. Рух рівномірний:  $\vec{N}_2 + m\vec{g} = 0$ ;

$OY$ :  $N_2 - mg = 0 \Rightarrow N_2 = mg$ . Отже,  $P_2 = mg$ .

Знайдемо значення шуканих величин:

$P_1 = 70(0,2 + 10) = 714 \text{ (Н)}$ ;  $P_2 = 70 \cdot 10 = 700 \text{ (Н)}$ ;  $P_1 - P_2 = 14 \text{ Н}$ .

*Відповідь:*  $P_1 - P_2 = 14 \text{ Н}$ .

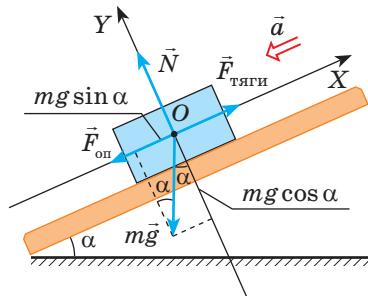
**Задача 4.** Автомобіль масою 4 т рухається на гору, сповільнюючи свій рух. Визначте силу тяги автомобіля, якщо ухил гори становить 0,02, а коефіцієнт опору рухові дорівнює 0,04. Прискорення автомобіля 0,15 м/с<sup>2</sup>.

*Зверніть увагу!* Ухил — синус кута  $\alpha$  нахилу полотна дороги до горизонту. Якщо ухил є малим (меншим від 0,1), то  $\cos \alpha \approx 1$ . Коефіцієнт опору рухові  $\mu$  враховує всі види тертя: тертя кочення, ковзання в осях тощо. Сила опору напрямлена протилежно руху тіла й обчислюється за формулою  $F_{\text{оп}} = \mu N$ , де  $N$  — сила нормальної реакції опори.

*Аналіз фізичної проблеми.* На тіло діють чотири сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$ , сила  $\vec{N}$  нормальної реакції опори, сила тяги  $\vec{F}_{\text{тяги}}$  та сила опору  $\vec{F}_{\text{оп}}$ .

Тіло зменшує свою швидкість, тому прискорення руху тіла напрямлене протилежно напрямку його руху.

Виконаємо пояснювальний рисунок, зазначивши на ньому сили, що діють на тіло, напрямком прискорення руху тіла та напрямки осей координат.



**Дано:**

$m = 4 \cdot 10^3 \text{ кг}$

$\sin \alpha = 0,02$

$\mu = 0,04$

$a = 0,15 \text{ м/с}^2$

$g = 10 \text{ м/с}^2$

**Знайти:**

$F_{\text{тяги}} \text{ — ?}$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Запишемо другий закон Ньютона у векторному вигляді:

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{оп}} = m\vec{a}.$$

Спроекуємо рівняння на осі координат (сила  $m\vec{g}$  не лежить на осі координат, тому для знаходження її проєкцій опустимо з кінця вектора  $m\vec{g}$  перпендикуляри на осі  $OX$  і  $OY$ :  $mg_x = -mg \sin \alpha$ ;  $mg_y = -mg \cos \alpha$ ) і запишемо вираз для  $F_{\text{оп}}$ :

$$\begin{cases} OX: F_{\text{тяги}} - F_{\text{оп}} - mg \sin \alpha = -ma, \\ OY: N - mg \cos \alpha = 0, \\ F_{\text{оп}} = \mu N; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_{\text{тяги}} = F_{\text{оп}} + mg \sin \alpha - ma, \\ N = mg \cos \alpha, \\ F_{\text{оп}} = \mu mg \cos \alpha. \end{cases}$$

Підставивши вираз для  $F_{\text{оп}}$  в перше рівняння системи, знайдемо  $F_{\text{тяги}}$ :

$$F_{\text{тяги}} = \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha - ma = m(\mu g \cos \alpha + g \sin \alpha - a).$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[F_{\text{тяги}}] = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 = \text{Н}; F_{\text{тяги}} = 4 \cdot 10^3 \cdot (0,04 \cdot 10 + 10 \cdot 0,02 - 0,15) = 1,8 \cdot 10^3 \text{ (Н)}$$

**Відповідь:**  $F_{\text{тяги}} = 1,8 \text{ кН}$ .

### Замість підсумків

Ви ознайомились із розв'язуванням деяких задач на рух тіл під дією кількох сил. Звичайно, розглянути в межах підручника всі типи таких задач неможливо, та й не потрібно. Головне — у вас є алгоритм розв'язання й приклади роботи з цим алгоритмом. Решта — за вами.

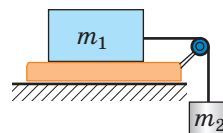
Отже, розв'язуючи будь-яку задачу з динаміки, спочатку виконайте пояснювальний рисунок, зазначте сили, запишіть рівняння другого закону Ньютона, виберіть систему відліку, знайдіть проєкції. Звичайно, слід знати, як напрямлені сили, коли вони виникають і за якими формулами визначаються. А далі, навіть якщо ви відразу не бачите всього ходу розв'язання задачі, — нічого страшного. Ви обов'язково знайдете якусь величину, знання якої допоможе вам побачити подальший хід розв'язання. Можна навіть сказати так: «Якщо не знаєш, як розв'язувати задачу, то почни її розв'язувати». Не потрібно боятися зробити хибний крок. Той не перемагає, хто не вміє програвати. Навчитися розв'язувати задачі з фізики може кожен, потрібно тільки їх розв'язувати!



### Вправа № 35

1. Під час старту космічний корабель рухається вертикально вгору з прискоренням  $40 \text{ м/с}^2$ . Із якою силою космонавт масою  $70 \text{ кг}$  тисне на крісло?
2. Дерев'яний брусок рівномірно тягнуть горизонтальною поверхнею, прикладаючи силу  $1 \text{ Н}$ . Визначте коефіцієнт тертя ковзання, якщо маса бруска дорівнює  $200 \text{ г}$ .
3. Тіло масою  $300 \text{ г}$ , підвішене на пружині, опускають униз із прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ . Визначте жорсткість пружини, якщо її видовження становило  $5 \text{ см}$ .

4. Вантаж масою 10 кг і об'ємом 1 дм<sup>3</sup> витягають із води за допомогою мотузки. Визначте силу натягу мотузки, якщо вантаж рухається з прискоренням 2 м/с<sup>2</sup>. Опором води знехтуйте.
5. Лижник масою 60 кг зупинився через 40 с після закінчення спуску. Визначте силу тертя, що діяла на лижника, і коефіцієнт тертя ковзання, якщо швидкість руху лижника наприкінці спуску становила 10 м/с.
6. Автомобіль масою 3 т рухається з гори, розвиваючи силу тяги 3000 Н. Визначте, з яким прискоренням рухається автомобіль, якщо коефіцієнт опору рухові дорівнює 0,04, а ухил становить 0,03.
7. Тіло масою  $m_1 = 1$  кг ковзає горизонтальною поверхнею під дією тягара масою  $m_2 = 250$  г (див. рисунок). Дана система тіл рухається з прискоренням 1,5 м/с<sup>2</sup>. Визначте коефіцієнт тертя між тілом і поверхнею.



## i

## § 36. ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ. ІМПУЛЬС. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

### Історія поняття імпульсу

У XIV ст. французький філософ і механік *Жан Буридан* (1300–1358) розширив відоме у філософії поняття «*impetus*» (поштовх до чого-небудь, спонукання) для пояснення причини руху тіл. Він писав: «Людина, яка кидає камінь, рухає свою руку разом із ним, а під час стрільби з лука тятєва деякий час рухається разом зі стрілою, штовхаючи стрілу... Поки те, що штовхає, контактує з тілом, тіло безперервно набуває *impetus*, тому його рух стає все швидше... Після відриву тіло рухається тільки завдяки *impetus*, який через опір середовища послаблюється, і швидкість руху тіла зменшується».



Із курсу фізики 7 класу ви дізналися про закон збереження механічної енергії, із курсу фізики 8 класу — про закон збереження електричного заряду. У цьому параграфі ви ознайомитеся з ще однією фізичною величиною, яка має властивість зберігатися (тобто не змінюватися під час взаємодії тіл).

### 1 Дізнаємося, за яких умов систему можна вважати замкнутою

Деякі тіла, що взаємодіють одне з одним, утворюють *систему тіл*. Сили, які характеризують взаємодію тіл системи між собою, називають *внутрішніми силами системи*.

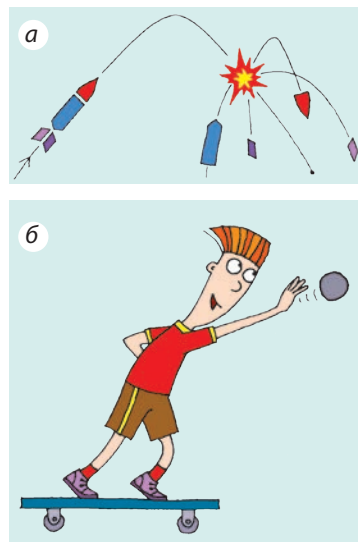
Систему тіл називають **замкнутою** (ізолюваною), якщо на тіла не діють зовнішні сили, а будь-які зміни стану системи є результатом дії внутрішніх сил.

Точно кажучи, на Землі неможливо знайти замкнену систему тіл: на будь-яке тіло діє сила тяжіння, будь-який рух тіл супроводжується тертям. Тому на практиці систему тіл вважають замкнутою, якщо *зовнішні сили, які діють на систему, зрівноважені або набагато менші від внутрішніх сил системи*.

Наприклад, під час вибуху феєрверка (рис. 36.1, а) зовнішні сили, що діють на його «осколки» (сила тяжіння та сила опору), у багато разів менші від сил,

з якими «осколки» відштовхуються, тому під час вибуху систему тіл «осколки» можна вважати замкненою. А от після вибуху притяганням Землі й опором повітря нехтувати не можна і система тіл «осколки» буде незамкненою.

Якщо людина штовхає ядро, стоячи на легкокорухомому візку (рис. 36.1, б), то систему тіл «людина на візку — ядро» можна вважати замкненою, адже силу тяжіння зрівноважує сила нормальної реакції опори, а сила тертя кочення є незначною. Якщо ж людина штовхає ядро, стоячи на землі, то система тіл «людина — ядро» є незамкненою, бо сила тертя є порівнянною із силою взаємодії людини і ядра.



**Рис. 36.1.** Якщо зовнішні сили, що діють на систему, зрівноважені або значно менші від внутрішніх сил системи, цю систему можна вважати замкненою

## 2 Визначаємо імпульс тіла

Згадаємо формулу для визначення прискорення:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$  — і запишемо *другий закон Ньютона* в іншому вигляді:

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}, \text{ або:}$$

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$$

У правій частині останньої рівності — зміна деякої векторної величини  $m\vec{v}$ . Цю величину називають *імпульсом тіла* або *кількістю руху*.

**Імпульс тіла** — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси тіла на швидкість його руху:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

*Одиниця імпульсу тіла в СІ* — кілограм-метр за секунду:

$$[p] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скористаємося законами Ньютона та доведемо: якщо тіла утворюють замкнену систему, їхній сумарний імпульс під час взаємодії не змінюється.

## 3 Доводимо закон збереження імпульсу

Розглянемо взаємодію двох тіл масами  $m_1$  і  $m_2$  (рис. 36.2). Тіла утворюють замкнену систему й рухаються зі швидкостями  $\vec{v}_{01}$  і  $\vec{v}_{02}$  відповідно.

У результаті взаємодії, яка триває певний інтервал часу  $t$ , обидва тіла змінюють швидкість свого руху до  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$ . Система замкнена, тому

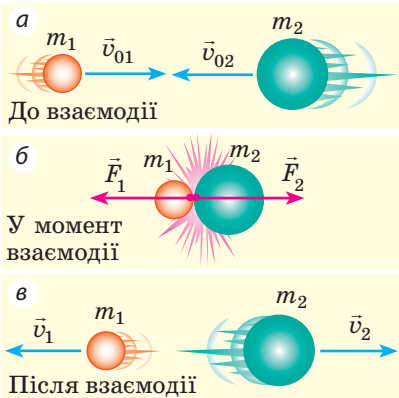
### Імпульс тіла

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$\vec{p}$  — імпульс тіла

$m$  — маса тіла

$\vec{v}$  — швидкість руху тіла



**Рис. 36.2.** До виведення закону збереження імпульсу

причиною зміни швидкості руху кожного тіла є тільки сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  — внутрішні сили системи. Відповідно до третього закону Ньютона ці сили рівні за модулем і протилежні за напрямком:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .

Запишемо для кожного тіла другий закон Ньютона:

$$\vec{F}_1 t = m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01}; \quad \vec{F}_2 t = m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}.$$

Оскільки  $\vec{F}_1 t = -\vec{F}_2 t$ , маємо:

$$m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01} = -(m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}).$$

Після перетворень отримаємо:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2, \text{ або}$$

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

Бачимо: незважаючи на те що після взаємодії імпульс кожного тіла змінився, сумарний імпульс системи залишився незмінним — він зберігся.

Отже, **закон збереження імпульсу:**

У замкненій системі тіл векторна сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів тіл після взаємодії.

Закон збереження імпульсу справджується для замкненої системи, яка містить будь-яку кількість тіл, — це фундаментальний закон фізики. У загальному вигляді закон збереження імпульсу записується так:

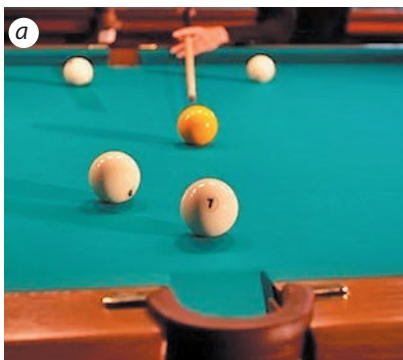
$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} =$$

$$= m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n,$$

де  $n$  — кількість тіл системи.

Із виявами закону збереження імпульсу ми постійно маємо справу в природі, техніці, побуті тощо (рис. 36.3).

*Зверніть увагу:* закон збереження імпульсу виконується тільки для замкненої системи тіл, тому перш ніж застосувати його для розв'язання задачі, потрібно визначити, чи є замкненою дана система.



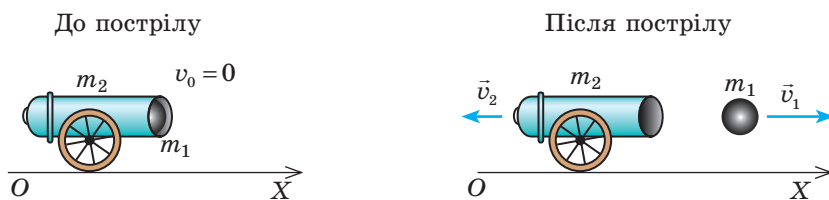
**Рис. 36.3.** Рух більярдних куль після удару одна об одну (а); віддача відбійного молотка (б) — поява всіх цих рухів є наслідком закону збереження імпульсу

#### 4 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Із гармати, встановленої на гладенькій горизонтальній поверхні, горизонтально випущено снаряд зі швидкістю 100 м/с. Якої швидкості руху набуде гармата після пострілу, якщо маса снаряда дорівнює 20 кг, а маса гармати — 2 т?

*Аналіз фізичної проблеми.* Систему тіл «снаряд — гармата» можна вважати замкненою, адже сили тертя в багато разів менші від сил, що виникають під час пострілу. Оберемо систему відліку, пов'язану з поверхнею Землі.

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому позначимо напрямки швидкостей руху тіл до і після взаємодії та напрямок осі  $OX$ :



Дано:

$$v_1 = 100 \text{ м/с}$$

$$m_1 = 20 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$v_{01} = v_{02} = 0$$

Знайти:

$$v_2 \text{ — ?}$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Запишемо закон збереження імпульсу у векторному вигляді:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.$$

Скориставшись рисунок, спрокуємо одержане рівняння на вісь  $OX$ :  $0 = m_1 v_1 - m_2 v_2$ . Звідси знайдемо  $v_2$ :

$$m_2 v_2 = m_1 v_1 \Rightarrow v_2 = \frac{m_1 v_1}{m_2}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$\left[ v_2 \right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}}{\text{кг}} = \text{м/с}; \quad v_2 = \frac{20 \cdot 100}{2 \cdot 10^3} = 1 \text{ (м/с)}.$$

*Відповідь:*  $v_2 = 1 \text{ м/с}$ .



#### Підбиваємо підсумки

Імпульс тіла  $\vec{p}$  — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси  $m$  тіла на швидкість  $\vec{v}$  його руху:  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

Систему тіл можна вважати замкненою, якщо зовнішні сили, які діють на систему, зрівноважені або набагато менші за внутрішні сили системи. У замкненій системі тіл виконується закон збереження імпульсу: геометрична сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює геометричній сумі імпульсів тіл після взаємодії:  $m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$ , де  $n$  — кількість тіл системи.



#### Контрольні запитання

**1.** Яку систему можна вважати замкненою? Наведіть приклади. **2.** Дайте означення імпульсу тіла. Якою є одиниця імпульсу тіла в СІ? **3.** Сформулюйте закон збереження імпульсу. **4.** Доведіть закон збереження імпульсу для системи двох тіл.



### Вправа № 36

- Футболіст веде м'яч масою 4,5 кг, рухаючись зі швидкістю 4 м/с відносно поверхні Землі. Визначте імпульс м'яча відносно: а) поверхні Землі; б) футболіста, який веде м'яч; в) іншого футболіста, який біжить назустріч м'ячу зі швидкістю 5 м/с.
- Куля масою 100 г, яка рухається з деякою швидкістю, влучає в нерухому кулю масою 150 г і застрягає в ній (рис. 1). Визначте швидкість руху кулі до зіткнення, якщо після зіткнення система рухалася зі швидкістю 10 м/с.
- Складіть і розв'яжіть задачу за даними рис. 2.

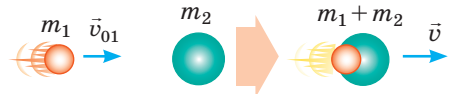


Рис. 1

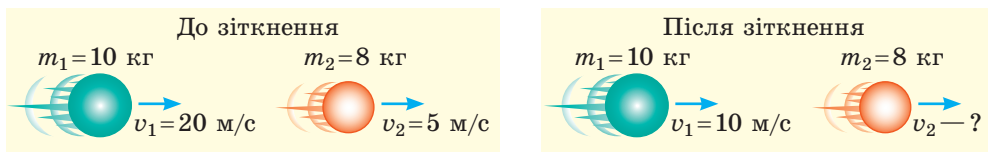


Рис. 2

- Із човна масою 200 кг, який рухається зі швидкістю 2 м/с, стрибає хлопчик масою 50 кг зі швидкістю 6 м/с. Визначте швидкість руху човна після стрибка, якщо хлопчик стрибає: а) з корми човна горизонтально, в бік, протилежний рухові човна; б) з носа човна горизонтально, в напрямку руху човна; в) з носа човна під кутом  $60^\circ$  до горизонту, в напрямку руху човна.
- Багато хто знайомий із ситуацією: човен наблизився до берега, а людина в човні, не дочекавшись, коли човен пришвартують, встала та пішла вперед — у результаті човен відпливає від берега назад (рис. 3). Поясніть цю ситуацію з погляду закону збереження імпульсу. Визначте відстань  $s$ , на яку відпливе човен від берега, якщо маса людини 70 кг, маса човна 130 кг, довжина  $l=4$  м. Опором води знехтуйте.
- Порівняйте ваш імпульс під час бігу на 100 м з імпульсом кулі. Дані задайте самостійно.

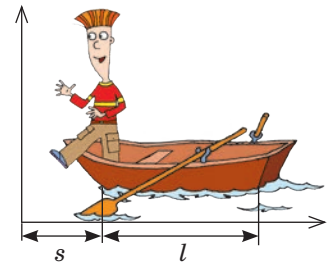


Рис. 3

### Фізика і техніка в Україні



**Кирило Дмитрович Синельников** (1901–1966) — видатний український фізик-експериментатор, академік НАНУ.

К. Д. Синельников увійшов в історію науки як соратник *І. В. Курчатова*, є відомим ученим у галузі фізики діелектриків і напівпровідників, фізики атомного ядра, фізичного матеріалознавства, фізики плазми й керованого термоядерного синтезу, фізичної та електронної оптики. У 1928–1930 рр. К. Д. Синельников стажувався в Кембриджі, в лабораторії *Е. Резерфорда*. Протягом 1944–1965 рр. учений очолював Харківський фізико-технічний інститут. У Харкові під керівництвом К. Д. Синельникова вперше було здійснено розщеплення ядра Літію протонами.

Президія АН УРСР започаткувала премію ім. К. Д. Синельникова за видатні роботи в галузі ядерної фізики.



## § 37. РЕАКТИВНИЙ РУХ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РАКЕТНОЇ ТЕХНІКИ. ДОСЯГНЕННЯ КОСМОНАВТИКИ

Завдяки чому можуть рухатися люди, автомобілі, тварини? Чому літають планери, птахи, метелики? Чому плавають риби, катери, підводні човни? Відповідь є простою: всі перелічені тіла від чогось відштовхуються: людина, тварина, автомобіль — від поверхні Землі; планери, птахи, метелики — від повітря; риби та катери — від води. А як пояснити рух космічного літального апарата, адже він не має можливості від чогось відштовхнутися? Проте космічні кораблі літають у відкритому космосі, виконують маневри, повертаються на Землю. Від чого ж вони відштовхуються? З'ясуємо.

### 1 Дізнаємося про реактивний рух

Проведемо невеликий дослід. Надуємо повітряну кульку і, не стягаючи її отвір ниткою, відпустимо. Кулька почне рухатись, і рухатиметься доти, поки з отвору виривається повітря. У цьому випадку ми маємо справу з *реактивним рухом* (рис. 37.1).

**Реактивний рух** — це рух, що виникає внаслідок відділення з деякою швидкістю від тіла якоїсь його частини.

Основою реактивного руху є закон збереження імпульсу. Повернемося до досліду з кулькою. Якщо отвір кульки закритий, вона перебуває в спокої й імпульс системи «кулька — повітря» дорівнює нулю.

Якщо отвір відкрити, то повітря почне вириватися назовні з досить великою швидкістю, тобто набуде певного імпульсу:  $\vec{p}_п = m_п \vec{v}_п$ . Сама кулька теж набуде імпульсу:  $\vec{p}_к = m_к \vec{v}_к$ , направленого в бік, протилежний імпульсу повітря.

Уявімо, що система «кулька — повітря» є замкненою. Тоді відповідно до закону збереження імпульсу загальний імпульс системи «кулька — повітря» залишається незмінним і дорівнює нулю:  $m_п \vec{v}_п + m_к \vec{v}_к = 0$ .

Отже, швидкість руху кульки становить:

$$\vec{v}_к = -\frac{m_п \vec{v}_п}{m_к}.$$



Рис. 37.1. Рух кульки під дією повітря, що виривається з отвору, — це реактивний рух

Прообразом сучасних реактивних двигунів можна вважати «*кулю Герона*», або «*еоліпіл*». Цей пристрій був створений у I ст. видатним давньогрецьким математиком і механіком *Героном* з Александрії. Пара, що виходить із закріплених на кулі зігнутих трубочок (сопел), змушує кулю обертатися.



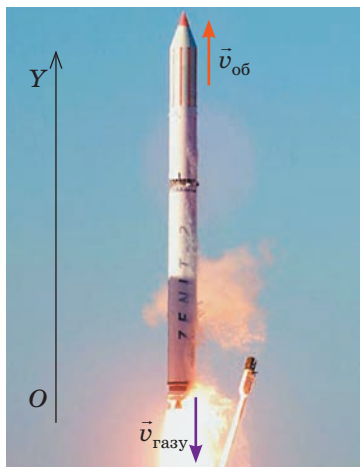


Рис. 37.2. Старт ракети «Зеніт» (вироблена в Україні)

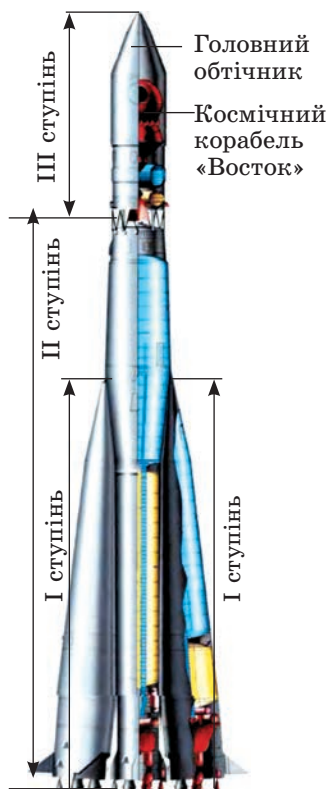


Рис. 37.3. Триступенева ракета-носіє «Восток»

Знак « $\leftarrow$ » свідчить про те, що кулька рухається в напрямку, протилежному напрямку руху повітря.

Розглянемо ще один приклад — віддачу автомата, який робить  $n$  пострілів за секунду. Позначимо масу однієї кулі  $m_k$ , а її швидкість у момент вильоту з дула —  $\vec{v}$ . Загальний імпульс, якого набувають кулі за секунду (швидкість зміни імпульсу), становитиме  $n \cdot m_k \vec{v}$ . Сила  $\vec{F}$ , яка діє на кулі, дорівнює швидкості зміни імпульсу куль:

$$\vec{F} = n \cdot m_k \vec{v}.$$

Згідно з третім законом Ньютона така сама за модулем сила, але напрямлена протилежно, діє й на автомат. Аналогічно виникає рушійна *реактивна сила* в ракеті, коли з її сопла викидається газ.

## 2 Вивчаємо реактивний рух ракети

**Ракета** — літальний апарат, який переміщується в просторі завдяки реактивній тязі, що виникає внаслідок відкидання ракетною частиною власної маси.

Відокремлюваною частиною ракети є струмінь гарячого газу, який утворюється в ході згоряння палива. Коли газовий струмінь із величезною швидкістю викидається із сопла ракети, то оболонка ракети одержує потужний імпульс, напрямлений у бік, протилежний швидкості руху струменя (рис. 37.2).

**?** Двигун ракети — це тепловий двигун. Що в цьому двигуні слугує нагрівником? робочим тілом? холодильником?

Уявімо неймовірний варіант: у момент старту все паливо ракети згоряє відразу. Оскільки до старту ракета перебуває у спокої, то закон збереження імпульсу після згоряння палива виглядав би так:  $0 = m_{об} \vec{v}_{об} + m_{газу} \vec{v}_{газу}$ , де  $m_{об} \vec{v}_{об}$  — імпульс оболонки ракети;  $m_{газу} \vec{v}_{газу}$  — імпульс газу. Спрямуємо вісь  $OY$  в бік руху ракети (див. рис. 37.2); спроектувавши векторне рівняння на цю вісь, маємо:  $0 = m_{об} v_{об} - m_{газу} v_{газу}$ , звідки:

$$v_{об} = \frac{m_{газу}}{m_{об}} v_{газу}.$$

Якщо припустити, що маса палива в 4 рази більша за масу оболонки ( $m_{\text{газу}} = 4m_{\text{об}}$ ), а швидкість струменя газу  $v_{\text{газу}} = 2$  км/с (приблизно з такою швидкістю із сопла ракети виривається розпечений газ), одержимо швидкість руху оболонки ракети:  $v_{\text{об}} = 4v_{\text{газу}} = 8$  км/с\*.

Отже, якби паливо ракети згоряло миттєво, а руху ракети нічого не заважало б, то швидкість, набрана ракетою, була б достатньою для того, щоб вивести ракету на орбіту Землі. Однак у реальності паливо згоряє поступово, а на рух ракети помітно впливає опір повітря. Розрахунки показують, що для досягнення необхідної швидкості маса палива має у 200 разів перевищувати масу оболонки, а це нереально реалізувати технічно.

Ще на початку ХХ ст. було доведено, що одноступенева ракета не зможе покинути Землю. Це можливо тільки за допомогою багатоступневих ракет: у таких ракетах ступені зі спорожнілими паливними резервуарами відкидаються в польоті (потім вони згоряють в атмосфері через тертя об повітря). При цьому маса ракети зменшується, відповідно збільшується швидкість її руху. Зазначимо, що всі ракети-носії космічних апаратів, як найперші, так і ті, що використовуються зараз, є багатоступневими.

На [рис. 37.3](#) подано триступеневу ракету-носію «Восток». Вона складається із чотирьох бічних блоків (I ступінь), розташованих навколо центрального блока (II ступінь). Космічний апарат установлюється на III ступені, під головним обтічником, який захищає його під час польоту в щільних шарах атмосфери. Кожний блок оснащений власними реактивними двигунами.

12 квітня 1961 р. ракета-носію «Восток» вивела на орбіту космічний корабель «Восток», на борту якого був перший у світі космонавт *Ю. О. Гагарін* ([рис. 37.4](#)). Цей політ був здійснений за ініціативою та під керівництвом видатного конструктора *С. П. Корольова* (1907–1966), уродженця м. Житомира.



**Рис. 37.4.** Юрій Олексійович Гагарін (1934–1968) — радянський льотчик-космонавт, перша людина у світі, яка здійснила політ у космос (12 квітня 1961 р.)



### Контрольні запитання

**1.** Дайте означення реактивного руху. **2.** Опишіть досліди зі спостереження реактивного руху. **3.** Запишіть закон збереження імпульсу для руху ракети, припустивши, що все її паливо згоряє миттєво в момент старту. **4.** Чому для запускання космічних кораблів з поверхні Землі використовують багатоступеневі ракети? **5.** Назвіть ім'я першого в історії людства космонавта та ім'я конструктора, під керівництвом якого було здійснено перший політ у космос.

\* Зазначимо: 8 км/с — це *перша космічна швидкість*. Таку швидкість повинно мати тіло в момент запуску з поверхні Землі, щоб стати її штучним супутником.



### Вправа № 37

1. «Сегнерове колесо» (рис. 1) — пристрій, винайдений механіком *Яношем Андрашем Сегнером* (1704–1777), — зараз застосовують для поливання газонів. Розгляньте рис. 1 і поясніть, як працює цей пристрій. Чи можна «сегнерове колесо» вважати реактивним двигуном? Обґрунтуйте свою відповідь.
2. Швидкість стрільби скорострільного кулемета, який ви, можливо, бачили у фільмі «Матриця», сягає 10 000 пострілів за хвилину; він випускає кулі масою 10 г зі швидкістю 600 м/с. Якою є сила віддачі такої зброї? Чи дійсно можна стріляти, тримаючи її в руках?
3. Від ракети, що рухалася зі швидкістю 2,4 км/с, відокремився перший ступінь, маса якого становила чверть маси ракети. З якою швидкістю почала рухатися ракета, якщо швидкість руху першого ступеня після відділення дорівнює 900 м/с відносно ракети.
4. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про українських космонавтів.
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, як рухається кальмар; які ще істоти використовують реактивний рух; де ще можна спостерігати реактивний рух у природі.



Рис. 1



Рис. 2



### Експериментальне завдання

Із пластикової пляшки та трубочок для коктейлю виготовте «сегнерове колесо» (рис. 2) і перевірте, як працює цей пристрій.

## Фізика і техніка в Україні



**Сергій Павлович Корольов** (1906–1966) — академік, всесвітньо відомий український радянський вчений у галузі ракетобудування та космонавтики, конструктор перших штучних супутників Землі та космічних кораблів.

Під керівництвом С. П. Корольова було розроблено й створено серію унікальних ракет-носіїв, які забезпечили справжній прорив у дослідженні космосу: запуск першого в історії штучного супутника Землі (4 жовтня 1957 р.); перший в історії космічний політ космонавта *Юрія Олексійовича Гагаріна* на кораблі «Восток» (12 квітня 1961 р.); виведення на орбіту першого багатомісного корабля серії «Восход» з екіпажем на борту (12 жовтня 1964 р.); перший вихід у відкритий космос космонавта *О. А. Леонова* (18 березня 1965 р.). С. П. Корольов виховав плеяду численних послідовників — учених, конструкторів, інженерів.

Цікаво, що перший космонавт із України *П. Р. Попович*, ракету з яким у 1962 р. вивів на орбіту С. П. Корольов, заспівав із космосу для головного конструктора його улюблену пісню «Дивлюсь я на небо...».

У Житомирі, на батьківщині конструктора, відкрито Музей космонавтики ім. С. П. Корольова, на центральній площі міста йому встановлено пам'ятник.

## § 38. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ІМПУЛЬСУ В МЕХАНІЧНИХ ЯВИЩАХ

Розв'язання багатьох практичних задач значно простішає, якщо скористатися законами збереження — законом збереження імпульсу та законом збереження і перетворення енергії, адже ці закони можна використовувати й тоді, коли сили, які діють у системі, є невідомими. Отже, згадаємо, які існують види механічної енергії, та розв'яжемо декілька задач на застосування законів збереження.

### 1 Згадуємо про механічну енергію

**Енергія** (від. грецьк. «діяльність») — це фізична величина, яка є загальною мірою руху та взаємодії всіх видів матерії.

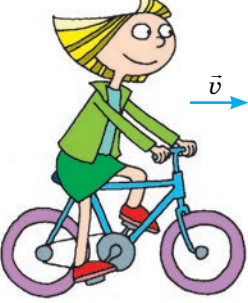


Енергію позначають символом  $E$  (або  $W$ ). *Одиниця енергії в СІ — джоуль:*

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

У механіці ми маємо справу з *механічною енергією*.

**Механічна енергія** — це фізична величина, яка є мірою руху та взаємодії тіл і характеризує здатність тіл виконувати механічну роботу.

### Види механічної енергії

Кінетична енергія $E_k$ — енергія, зумовлена рухом тіла	Потенціальна енергія $E_p$ — енергія, зумовлена взаємодією тіл або частин тіла	
$E_k = \frac{mv^2}{2}$ <p><math>m</math> — маса тіла <math>v</math> — модуль швидкості руху тіла</p> 	<p><math>E_p</math> піднятого тіла: <math>E_p = mgh</math></p> <p><math>m</math> — маса тіла <math>h</math> — висота відносно нульового рівня</p> 	<p><math>E_p</math> пружно деформованої пружини (шнура):</p> $E_p = \frac{kx^2}{2}$ <p><math>k</math> — жорсткість пружини (шнура) <math>x</math> — видовження</p> 
<p>Сума кінетичної і потенціальної енергій тіла (системи тіл) — це <b>повна механічна енергія тіла (системи тіл):</b> <math>E = E_k + E_p</math></p>		

Вивчаючи механічну енергію в курсі фізики 7 класу, ви дізналися про те, що *у випадку, коли система тіл є замкненою, а тіла системи взаємодіють одне з одним тільки силами пружності та силами тяжіння, повна механічна енергія системи не змінюється.*

У цьому полягає **закон збереження і перетворення механічної енергії**, який математично можна записати так:

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p,$$

де  $E_{k0} + E_{p0}$  — повна механічна енергія системи тіл на початку спостереження;  $E_k + E_p$  — повна механічна енергія системи тіл наприкінці спостереження.

## 2 Згадуємо алгоритм розв'язування задач на закон збереження механічної енергії

### Алгоритм розв'язування задач із застосуванням закону збереження механічної енергії

1. Уважно прочитайте умову задачі. З'ясуйте, чи є система замкненою, чи можна знехтувати дією сил опору. Запишіть коротку умову задачі.
2. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому зазначте нульовий рівень, початковий та кінцевий стан тіла (системи тіл).
3. Запишіть закон збереження і перетворення механічної енергії. Конкретизуйте цей запис, скориставшись даними, наведеними в умові задачі, та відповідними формулами для визначення енергії.
4. Розв'яжіть отримане рівняння відносно невідомої величини. Перевірте її одиницю та визначте числове значення.
5. Проаналізуйте результат, запишіть відповідь.

Оскільки закон збереження механічної енергії значно спрощує розв'язання багатьох практичних задач, розглянемо алгоритм розв'язування подібних задач на конкретному прикладі.

**Задача 1.** Учасник атракціону з банджі-джампінгу здійснює стрибок з моста (див. [рисунок](#)). Якою є жорсткість гумового канату, до якого прив'язаний спортсмен, якщо під час падіння шнур розтягнувся від 40 до 100 м? Маса спортсмена 72 кг, початкова швидкість його руху дорівнює нулю. Опором повітря знехтуйте.

*Аналіз фізичної проблеми.* Опором повітря нехтуємо, тому можна вважати систему тіл «Земля — людина — шнур» замкненою і для розв'язання задачі скористатися законом збереження механічної енергії: на початку стрибка спортсмен має потенціальну енергію піднятого тіла, в найнижчій точці ця енергія перетворюється на потенціальну енергію деформованого шнура.



Дано:

$$l_0 = 40 \text{ м}$$

$$l = 100 \text{ м}$$

$$m = 72 \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

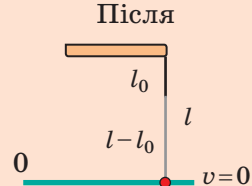
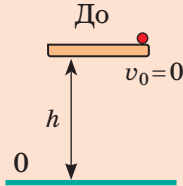
$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

Знайти:

$$k - ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання

Виконаємо рисунок, на якому зазначимо початкове та кінцеве положення спортсмена. За нульовий рівень оберемо найнижче положення спортсмена (шнур розтягнений максимально, швидкість руху спортсмена дорівнює 0). Запишемо закон збереження механічної енергії.



$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p.$$

$$E_{k0} = 0 \text{ (оскільки } v_0 = 0 \text{);}$$

$$E_{p0} = mgh, \text{ де } h = l \text{ — довжина розтягнутого шнура}$$

$$E_k = 0 \text{ (оскільки } v = 0 \text{);}$$

$$E_p = \frac{kx^2}{2}, \text{ де } x = l - l_0 \text{ — видовження шнура}$$

Отже, маємо:  $0 + mgl = 0 + \frac{k(l - l_0)^2}{2}$ . Остаточно отримуємо:  $k = \frac{2mgl}{(l - l_0)^2}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[k] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad k = \frac{2 \cdot 72 \cdot 10 \cdot 100}{(100 - 40)^2} = \frac{2 \cdot 72 \cdot 1000}{3600} = 40 \text{ (Н/м)}.$$

Відповідь:  $k = 40 \text{ Н/м}$ .

3

### Розв'язуємо задачу, одночасно застосовуючи закон збереження механічної енергії та закон збереження імпульсу

Чи грали ви в більярд? Спробуємо описати один із випадків зіткнення більярдних куль, а саме **пружний центральний удар** — зіткнення, під час якого втрати механічної енергії відсутні, а швидкості руху куль до і після удару напрямлені вздовж прямої, що проходить через центри куль.

**Задача 2.** Куля, яка рухалася більярдним столом зі швидкістю 5 м/с, зіштовхується з нерухомою кулею такої самої маси (див. рисунок). Визначте швидкості руху куль після зіткнення. Удар вважайте пружним центральним.

*Аналіз фізичної проблеми.* Систему двох куль можна вважати замкнутою, удар є пружним, тому втрати механічної енергії відсутні. Отже, для розв'язання задачі можна використати і закон збереження механічної енергії, і закон збереження імпульсу. Оберемо за нульовий рівень поверхню столу. У даному випадку потенціальні енергії куль до і після удару дорівнюють нулю, тому повна механічна енергія системи і до, і після удару складається тільки з кінетичних енергій куль.



**Дано:**

$v_{01} = 5 \text{ м/с}$

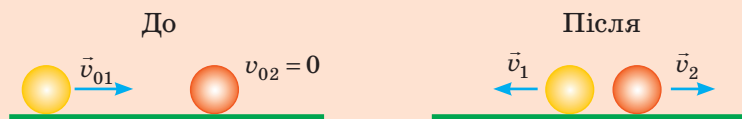
$v_{02} = 0$

$m_1 = m_2 = m$

**Знайти:**

$v_1 - ? \quad v_2 - ?$

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Виконаємо рисунок, на якому зазначимо положення куль до і після удару.



Запишемо для системи двох куль закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії, врахувавши, що  $v_{02} = 0$ :

$$\begin{cases} m\vec{v}_{01} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2 \quad | : m, \\ \frac{mv_{01}^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} \quad | \times 2 : m, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \vec{v}_{01} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases} \quad \text{Знайдемо проекції швидко-}$$

стей на вісь  $OX$ :  $\begin{cases} v_{01} = -v_1 + v_2, \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$  Оскільки  $v_{01} = 5 \text{ м/с}$ , маємо:  $\begin{cases} 5 = -v_1 + v_2, \\ 25 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$

Розв'язавши останню систему, отримуємо:  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 5 \text{ м/с}$ .

**?** Розв'яжіть останню систему рівнянь самостійно.

*Аналіз результатів.* Бачимо, що кулі «обмінялися» швидкостями: куля 1 зупинилась, а куля 2 набула швидкості кулі 1 до зіткнення.

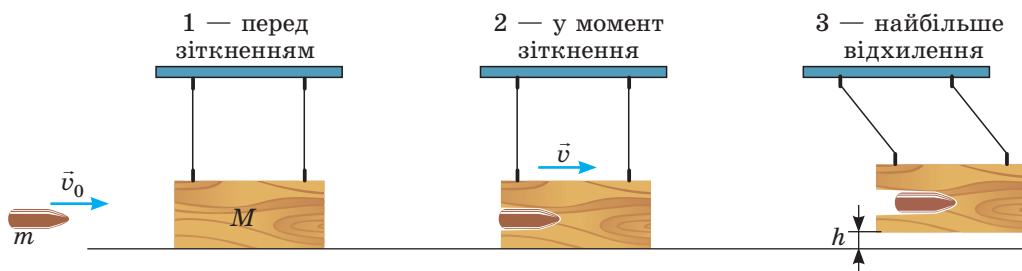
Зазначимо: *в разі пружного центрального удару двох тіл однакової маси ці тіла «обмінюються» швидкостями незалежно від того, якими були початкові швидкості руху тіл.*

*Відповідь:*  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 5 \text{ м/с}$ .

#### 4 Розв'язуємо задачу, в якій закон збереження механічної енергії і закон збереження імпульсу слід застосувати по черзі

Якщо вам цікаво, з якою швидкістю вилітає стріла з вашого лука або якою є швидкість руху кулі пневматичної гвинтівки, допоможе простий пристрій — *балістичний маятник* — підвішене на металевих стрижнях важке тіло. З'ясуємо, як визначити швидкість руху кулі за допомогою цього пристрою.

**Задача 3.** Куля масою 0,5 г влучає в підвішений на стрижнях дерев'яний брусок масою 300 г і застрягає в ньому. Визначте, з якою швидкістю рухалася куля, якщо після влучення кулі брусок піднявся на висоту 1,25 см (див. рисунок).





*Аналіз фізичної проблеми.* Під час влучення кулі в брусок останній набуває швидкості. Час взаємодії дуже короткий, тому протягом цього часу можна вважати систему «куля — брусок» замкненою та скористатися законом збереження імпульсу. А от законом збереження механічної енергії скористатися не можна, оскільки присутня сила тертя.

Коли куля вже зупинила рух усередині бруска і він почав відхилятися, то можна знехтувати дією сили опору повітря та скористатися законом збереження механічної енергії для системи «Земля — брусок». А от імпульс бруска буде зменшуватись, оскільки дія стрижнів уже не компенсує дію Землі.

**Дано:**

$$m = 0,5 \text{ г} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$M = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$$

$$h = 1,25 \text{ см} = 0,0125 \text{ м}$$

**Знайти:**

$$v_0 \text{ — ?}$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Запишемо закон збереження імпульсу для положень 1 і 2 (див. рисунок), взявши до уваги, що в положенні 1 брусок перебуває в спокої, а в положенні 2 брусок і куля рухаються разом:

$$m \vec{v}_0 + M \cdot 0 = (m + M) \cdot \vec{v}.$$

Спроекуємо одержане рівняння на вісь  $OX$ :

$$m v_0 = (m + M) \cdot v \Rightarrow v_0 = \frac{(m + M) \cdot v}{m} \quad (1).$$

Запишемо закон збереження механічної енергії для положень 2 і 3 та конкретизуємо його:

$$E_{k2} + E_{p2} = E_{k3} + E_{p3}.$$

$$E_{k2} = \frac{(m + M) \cdot v^2}{2};$$

$$E_{k3} = 0 \text{ (брусок зупинився);}$$

$$E_{p2} = 0 \text{ (брусок на нульовому рівні).}$$

$$E_{p3} = (M + m)gh.$$

$$\text{Отже: } \frac{(m + M) \cdot v^2}{2} = (M + m)gh.$$

Після скорочення на  $(M + m)$  отримаємо:  $\frac{v^2}{2} = gh$ , або  $v = \sqrt{2gh}$  (2).

Підставивши вираз для швидкості (2) у формулу (1), отримаємо *формулу для визначення швидкості руху тіла за допомогою балістичного маятника:*

$$v_0 = \frac{(m + M) \cdot \sqrt{2gh}}{m}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v_0] = \frac{\text{кг} \cdot \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad v_0 = \frac{300,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,0125}}{0,5 \cdot 10^{-3}} \approx 300 \text{ (м/с)}.$$

**Відповідь:**  $v_0 \approx 300 \text{ м/с}$ .



### Замість підсумків

Ми розглянули лише декілька прикладів розв'язання задач. На перший погляд здається, що й імпульс, і механічна енергія зберігаються не завжди. Що стосується імпульсу — це не так. *Закон збереження імпульсу — це загальний закон Всесвіту.* А ніби «поява» імпульсу (див. задачу 1 у § 38) чи його «зникнення» (див. задачу 3 у § 38, положення тіл 2 і 3) пояснюються

тим, що Земля теж отримує імпульс. Саме тому, розв'язуючи задачі, ми «шукаємо» замкнену систему.

А от *механічна енергія дійсно зберігається не завжди*. Система може отримати додаткову механічну енергію, якщо зовнішні сили виконають додатну роботу (наприклад, ви кинули м'яч). Система може втратити частину механічної енергії, якщо зовнішні сили виконають від'ємну роботу (наприклад, велосипед зупинився через дію сили тертя). А от *повна енергія (сума енергій, яку мають тіла системи та частинки, з яких ці тіла складаються) завжди залишається незмінною*. Закон збереження енергії — це загальний закон Всесвіту.



### Вправа № 38

Виконуючи завдання 2–4, опором повітря знехтуйте.

- Вантаж масою 40 кг скинули з літака. Після того як на висоті 400 м швидкість руху вантажу досягла 20 м/с, він почав рухатися рівномірно. Визначте: 1) повну механічну енергію вантажу на висоті 400 м; 2) повну механічну енергію вантажу в момент приземлення; 3) енергію, на яку перетворилася частина механічної енергії вантажу.
- Кульку кинули горизонтально з висоти 4 м зі швидкістю 8 м/с. Визначте швидкість руху кульки в момент падіння. Розв'яжіть задачу двома способами: 1) розглянувши рух кульки як рух тіла, кинутого горизонтально; 2) скориставшись законом збереження механічної енергії. Який спосіб у даному випадку зручніший?
- Пластилінова кулька 1 масою 20 г і втричі більша за масою кулька 2 підвішені на нитках. Кульку 1 відхилили від положення рівноваги на висоту 20 см і відпустили. Кулька 1 зіштовхнулася з кулькою 2 і прилипла до неї (рис. 1). Визначте: 1) швидкість руху кульки 1 до зіткнення; 2) швидкість руху кульок після зіткнення; 3) максимальну висоту, на яку піднімуться кульки після зіткнення.
- Кулька масою 10 г вилітає з пружинного пістолета, влучає в центр підвішеного на нитках пластилінового бруска масою 30 г і прилипає до нього. На яку висоту підніметься брусок, якщо перед пострілом пружина була стиснута на 4 см, а жорсткість пружини — 256 Н/м?

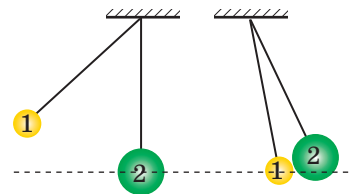


Рис. 1



### Експериментальне завдання

«Балістичний маятник». Виготовте балістичний маятник (рис. 2). Для цього виріжте з паперової коробки передню стінку, виліпіть із пластиліну ще одну коробку, яка трохи менша за розміром від паперової, вставте пластилінову коробку в паперову та підвісьте пристрій на нитках так, як показано на рис. 2. Випробуйте пристрій, вимірявши, наприклад, швидкість руху кульки дитячого пружинного пістолета. Для розрахунків скористайтеся формулою, отриманою під час розв'язання задачі 3 у § 38.

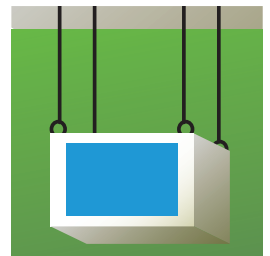
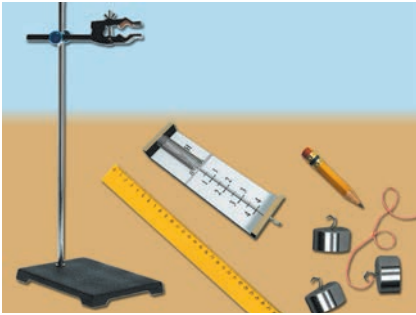


Рис. 2



**Тема.** Вивчення закону збереження механічної енергії.

**Мета:** переконатися на досліді, що повна механічна енергія замкненої системи тіл залишається незмінною, якщо в системі діють тільки сили тяжіння та сили пружності.

**Обладнання:** штатив із муфтою та лапкою, динамометр, набір тягарців, лінійка завдовжки 40–50 см, гумовий шнур завдовжки 15 см із покажчиком і петельками на кінцях, олівець, міцна нитка.

### Теоретичні відомості

Для виконання роботи можна використати експериментальну установку, зображену на рис. 1. Попередньо позначивши на лінійці положення покажчика у випадку ненавантаженого шнура (позначка 0), до петлі шнура підвешують тягарець, який потім відтягують униз (стан 1), надаючи шнуру деякого видовження  $x_1$  (рис. 2). У стані 1 повна механічна енергія системи «шнур — тягарець — Земля» дорівнює потенціальній енергії розтягнутого шнура:

$$E_1 = \frac{kx_1^2}{2} = \frac{F_1 x_1}{2}, \quad (1)$$

де  $F_1 = kx_1$  — модуль сили пружності шнура за його розтягнення на  $x_1$ .

Далі тягарець відпускають і відзначають положення покажчика в той момент, коли тягарець досягне максимальної висоти (стан 2). У цьому стані повна механічна енергія системи дорівнює сумі потенціальній енергії піднятого на висоту  $h$  тягарця й потенціальній енергії розтягнутого шнура:

$$E_2 = \frac{kx_2^2}{2} + mgh = \frac{F_2 x_2}{2} + P \cdot h, \quad (2)$$

де  $F_2 = kx_2$  — модуль сили пружності шнура за умови його розтягнення на  $x_2$ ;  $P = mg$  — вага тягарця.

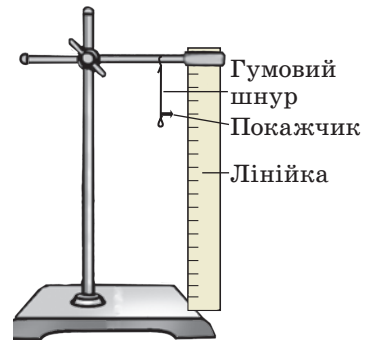


Рис. 1

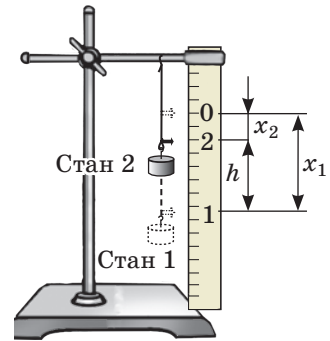


Рис. 2

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

#### II

#### Підготовка до експерименту

- Перед тим як розпочати вимірювання, згадайте:
  - 1) вимоги безпеки під час виконання лабораторних робіт;
  - 2) закон збереження повної механічної енергії.
- Проаналізуйте формули (1) і (2) та поміркуйте, які вимірювання слід зробити, щоб визначити повну механічну енергію системи у стані 1 і стані 2. Складіть план проведення експерименту.

- Зберіть установку, як показано на рис. 1.
- Потягнувши за нижню петельку вертикально вниз, випряміть шнур, не натягуючи його. Позначте на лінійці олівцем положення покажчика у випадку ненавантаженого шнура й поставте позначку 0.

### Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац підручника). Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.*

- Визначте за допомогою динамометра вагу  $P$  тягарця.
- Підвісьте тягарець до петельки. Відтягнувши тягарець униз, позначте на лінійці положення покажчика, біля позначки поставте цифру 1.
- Відпустіть тягарець. Помітивши положення покажчика в момент, коли тягарець сягнув найбільшої висоти, поставте у відповідному місці позначку 2. *Зверніть увагу:* якщо позначка 2 розташується вище, ніж позначка 0, дослід необхідно повторити, зменшивши розтягнення шнура та відповідно змінивши положення позначки 1.
- Виміряйте сили пружності  $F_1$  і  $F_2$ , які виникають у гумовому шнурі в разі його розтягнення на  $x_1$  і  $x_2$  відповідно. Для цього зніміть тягарець і, зачепивши петлю шнура гачком динамометра, розтягніть шнур спочатку до позначки 1, а потім до позначки 2.
- Вимірявши відстані між відповідними позначками, визначте видовження  $x_1$  і  $x_2$  гумового шнура, а також максимальну висоту  $h$  підйому тягарця (див. рис. 2).
- Повторіть дії, описані в пунктах 1–6, підвісивши до шнура два тягарці разом.

Номер дослідів	Вага тягарця $P$ , Н	Видовження шнура		Сила пружності		Висота підйому $h$ , м	Повна механічна енергія	
		$x_1$ , м	$x_2$ , м	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н		$E_1$ , Дж	$E_2$ , Дж
1								
2								

### Опрацювання результатів експерименту

- Для кожного дослідів визначте:
  - повну механічну енергію системи у стані 1;
  - повну механічну енергію системи у стані 2.
- Закінчіть заповнення таблиці.

### Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент та його результати. Сформулюйте висновок, у якому: 1) порівняйте одержані вами значення повної механічної енергії системи у стані 1; у стані 2; 2) зазначте причини можливої розбіжності результатів; 3) укажіть фізичні величини, вимірювання яких, на ваш погляд, дало найбільшу похибку.

\* **Завдання «із зірочкою»**

За формулою  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{E_1}{E_2} \right| \cdot 100\%$  оцініть відносну похибку експерименту.

+ **Творче завдання**

Візьміть невелику кульку на довгій міцній нитці. До нитки прив'яжіть гумовий шнур і, тримаючись за кульку, із силою потягніть шнур униз. Виміряйте видовження шнура. Відпустіть кульку. Виміряйте висоту, на яку піднялась кулька. Визначте жорсткість шнура та обчисліть цю висоту теоретично. Порівняйте результат обчислення з результатом експерименту.

## § 39. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ В ПРИРОДІ. МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАКОНІВ І ТЕОРІЙ. ФУНДАМЕНТАЛЬНИЙ ХАРАКТЕР ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ

Дослідження Всесвіту завжди ставило перед дослідниками низку питань, серед яких передусім «Як побудований Всесвіт, тобто якою є його структура?», «Як із невеликих цеглинок матерії утворюється все різноманіття природних явищ і природних об'єктів?», «Чи однаковим законам підкорюються різні природні явища?». Вивчаючи фізику, ви намагалися знайти відповіді на ці питання. Спробуємо узагальнити.

1 **Відповідаємо на запитання: «Якою є структура Всесвіту?»**

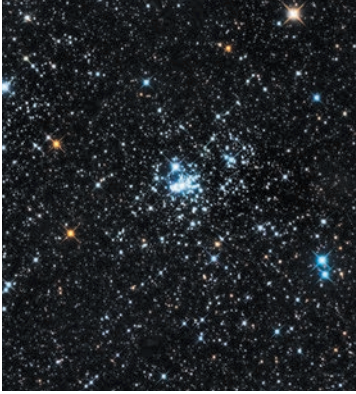
Усю доступну для спостереження частину матеріального світу називають **Всесвітом**.

Усі об'єкти Всесвіту та властиві їм явища наука поділяє на три якісно різні рівні: *мікросвіт*, *макросвіт*, *мегасвіт*. Об'єкти кожного рівня Всесвіту передусім відрізняються масою та розмірами:

Структурні рівні Всесвіту		
Мікросвіт	Макросвіт	Мегасвіт
Світ молекул, атомів та їхніх складників	Світ речовин, живих істот, макротіл	Світ планет, зір, зоряних скупчень — галактик
Розмір $10^{-18}$ – $10^{-10}$ м Маса не більше $10^{-10}$ кг	Розмір $10^{-10}$ – $10^7$ м Маса $10^{-10}$ – $10^{20}$ кг	Розмір понад $10^7$ м Маса понад $10^{20}$ кг

? Наведіть декілька об'єктів мікросвіту; макросвіту; мегасвіту.

Кожний структурний рівень Всесвіту описується власною фізичною теорією. Так, рух і взаємодію об'єктів мікросвіту насамперед описує *квантова механіка*. У макросвіті панує *класична механіка*, в основу якої покладено закони механіки Ньютона. Мегасвіт — це передусім об'єкт *релятивістської механіки*, яка базується на теорії відносності А. Ейнштейна.



**Рис. 39.1.** Класична механіка Ньютона справджується тільки для описання руху тіл зі швидкістю, яка набагато менша від швидкості поширення світла. Рух тіл, швидкість яких є порівнянною зі швидкістю світла (наприклад, рух віддалених галактик), описує *спеціальна теорія відносності*



**Рис. 39.2.** Випромінювання електромагнітних хвиль змінним електричним струмом можна пояснити за допомогою *класичної електродинаміки* Максвелла, а от для пояснення випромінювання атомом світла (електромагнітних хвиль оптичного діапазону) слід застосовувати *квантову електродинаміку*, що містить класичну як складову

## 2 Дізнаємося, чому фізичні закони й теорії мають межі застосування

Ознайомившись із п. 1 цього параграфу, дехто з вас здивований. Чому, наприклад, закони механіки Ньютона не можна застосовувати для описання руху мікрочастинок? Це ж закони! Але згадаємо, як будується фізична теорія.

Якщо ми вивчаємо певний фізичний процес (спостерігаємо за ним, здійснюємо експерименти, виконуємо розрахунки), то не намагаємось охопити всі явища, що спостерігаються в ході цього процесу, не враховуємо вплив усіх чинників. Ми обираємо лише чинники, які, на нашу думку, суттєво впливають на процес, тобто будуюмо *фізичну модель* процесу. Використання моделі дає нам змогу пояснити природу цілої низки фізичних явищ, сформулювати закони, яким вони підкоряються. Сукупність фізичних законів утворює *фізичну теорію*.

Оскільки для створення теорії ми використовуємо фізичну модель процесу, а наші знання про цей процес обмежені певною кількістю відомих на даний час фактів, то не дивно, що згодом накопичаться нові факти, які вже не будуть укладатися в межі створеної нами теорії. Тобто виявиться, що наша теорія має *межі застосування*. Нові факти ведуть до створення нової теорії, яка зазвичай містить попередню теорію як складову, а не суперечить їй (рис. 39.1, 39.2).

## 3 Фундаментальні взаємодії у Всесвіті



Згадайте курси фізики й хімії. Завдяки якій взаємодії утримуються нуклони в ядрі? електрони в атомі? атоми в молекулі? молекули в речовині? людина біля планети? планета біля Сонця?

Сподіваємося, що ви змогли відповісти на запитання, назвавши три відомі вам види взаємодії: *сильна, електромагнітна, гравітаційна*. Саме взаємодія зумовлює об'єднання «цеглинок» матерії в атоми, атомів — у молекули, молекул — у речовину і т. д. Будь-які властивості тіл, будь-які явища пов'язані із взаємодією.

На сьогодні в науці розрізняють *чотири фундаментальні взаємодії*: гравітаційну, електромагнітну, сильну, слабку (див. таблицю).

Протягом кількох десятиліть учені намагаються створити теорію єдиної універсальної взаємодії. Деякі кроки вже зроблено. Наприкінці 60-х рр. минулого століття вдалося створити теорію так званої *електрослабкої взаємодії*, в межах якої об'єднано електромагнітну та слабку взаємодії. Але до повного («великого») об'єднання всіх видів взаємодій ще далеко.

Фундаментальні взаємодії в природі			
гравітаційна	електромагнітна	сильна	слабка
Будь-які матеріальні об'єкти у Всесвіті притягуються один до одного	Електрична взаємодія заряджених тіл і частинок; магнітне притягання та відштовхування рухомих заряджених частинок і намагнічених тіл	Взаємне притягання нуклонів усередині ядра незалежно від їхнього заряду	«Відповідає» за $\beta$ -розпад атомних ядер
Виявляється на будь-яких відстанях	Виявляється на будь-яких відстанях	Виявляється на відстанях порядку $10^{-15}$ м (розмір нуклона)	Виявляється на відстанях порядку $10^{-18}$ м
Утворення та існування планет, зіркових планетних систем, галактик тощо	Утворення та існування атомів, молекул, фізичних тіл; утворення радіосигналів, нервових імпульсів тощо	Існування та стійкість атомних ядер	Повільні розпади частинок
		Світіння зір	

#### 4 Дізнаємося про фундаментальний характер законів збереження в природі

Простір і час є своєрідною ареною, на якій «розігруються» всі явища та процеси у Всесвіті. Тому не дивно, що саме з фундаментальними властивостями простору і часу пов'язані найважливіші закони Всесвіту — закони збереження. Ці закони називають *фундаментальними*, адже їм підкоряються як об'єкти макросвіту, так і об'єкти мікро- та мегасвіту, — *ці закони справджуються під час будь-якої взаємодії*.

Тривалий час учені інтуїтивно здогадувалися, що кожен закон збереження пов'язаний із певною симетрією у Всесвіті (рис. 39.3).

У 1918 р. видатний німецький математик *Елмі Амалі Нетер* (1882–1935) довела теорему, згідно з якою *кожній неперервній симетрії фізичної системи відповідає певний закон збереження*. Так, закон збереження енергії є наслідком однорідності часу\* — симетрії відносно зсуву в часі; закон

\* *Однорідність простору і часу* означає, що фізичні властивості та явища є однаковими в будь-якій точці простору, в будь-який момент часу.



**Рис. 39.3.** Найпростіші типи симетрії у природі

збереження імпульсу є наслідком однорідності простору — симетрії відносно перенесення в просторі.

Одним із наслідків законів збереження є передбачення неможливості деяких процесів, адже ці закони дозволяють зробити узагальнені висновки навіть без детальної інформації. Наприклад, ми знаємо про неможливість створення вічного двигуна: власне ідея його існування суперечить закону збереження і перетворення енергії.

Ви знаєте про три фундаментальні закони збереження: *закон збереження і перетворення енергії, закон збереження імпульсу, закон збереження електричного заряду*. Розглянемо прояви закону збереження і перетворення енергії.

### 5 Розглядаємо прояви закону збереження і перетворення енергії

Закон збереження і перетворення енергії свідчить, що *енергія нікуди не зникає, нізвідки не виникає, вона лише передається від одного тіла до іншого, перетворюється з одного виду на інший*. Згадаємо види енергії:

Види енергії в природі						
Механічна	Внутрішня			Електромагнітна		
	теплова	хімічна	ядерна	електрична	магнітна	випромінювання
Енергія руху та взаємодії тіл або частин тіла	Енергія хаотичного руху та взаємодії частинок речовини	Енергія хімічних зв'язків	Енергія, «схована» в ядрах атомів	Енергія електричного струму	Енергія постійних магнітів і електромагнітів	Енергія електромагнітних хвиль

Розглянемо процеси перетворення енергії на прикладах.

*Приклад 1.* На рис. 39.4 подано два ланцюжки перетворення сонячної енергії. Прослідкуємо за «природним» ланцюжком (рис. 39.4, а).

*Ядерна енергія, яка вивільняється на Сонці в ході термоядерної реакції, перетворюється на енергію випромінювання.*

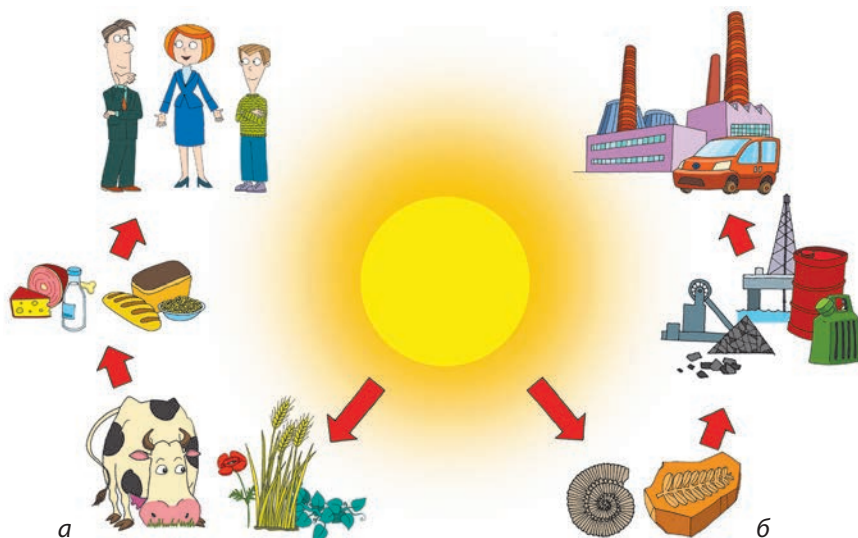
Потрапляючи на зелене листя рослин, ця енергія поглинається хлорофілом і перетворюється на *хімічну енергію поживних речовин*.



Споживаючи хімічну енергію, збережену рослинами (їжу), організм людини перетворює її на *хімічну енергію клітин*.

Хімічна енергія, запасена, наприклад, у м'язах людини, перетворюється на *механічну енергію* (кінетичну енергію руху).

**?** Спробуйте описати перетворення сонячної енергії в техніці (рис. 39.4, б).



**Рис. 39.4.** Перетворення сонячної енергії у природі (а); техніці (б)

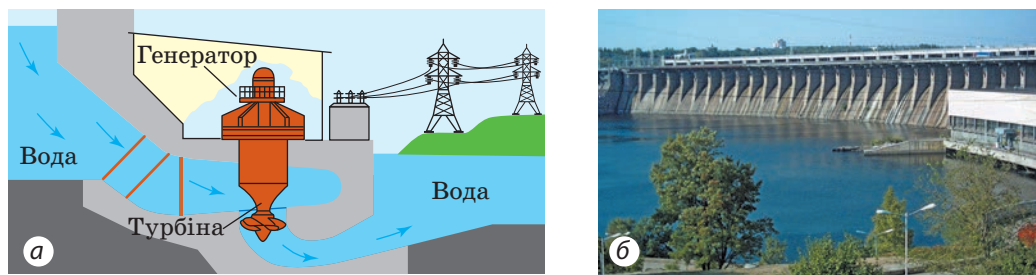
*Приклад 2.* Розглянемо «рух» енергії під час роботи гідроелектростанції (рис. 39.5). Гребля перегородила річку — утворилося водосховище, рівень води в якому вищий за рівень у річці за греблею, тому вода у водосховищі має потенціальну енергію.

Падаючи з висоти, вода втрачає потенціальну енергію, але набуває кінетичної.

Потрапляючи на лопаті турбіни, вода віддає їй свою кінетичну енергію, і турбіна отримує кінетичну енергію обертання.

Турбіна обертає ротор електричного генератора, в якому механічна енергія обертання перетворюється на електричну енергію.

Проводами електрична енергія доходить до електролампи у вашій оселі і в ній перетворюється на світлову й теплову.



**Рис. 39.5.** Гідроелектростанція: а — схема роботи; б — вигляд (ДніпроГЕС)

У ході кожного із процесів частина енергії перетворюється на внутрішню (нагрівання води, підшипників турбіни та генератора, проводів тощо).

У кожному з наведених ланцюжків енергія перетворюється з одного виду на інший, проте *загальна кількість енергії залишається незмінною* (енергія зберігається). Якщо ми додамо всі значення, які відповідають різним видам енергії, то сума завжди буде однаковою.



### Підбиваємо підсумки

Усю доступну для спостереження частину матеріального світу називають Всесвітом. Усі об'єкти Всесвіту та властиві їм явища наука поділяє на три якісно різні рівні: мікросвіт, макросвіт і мегасвіт.

Усі фізичні явища та існування об'єктів Всесвіту можна пояснити на основі фундаментальних видів взаємодій: гравітаційної, електромагнітної, сильної, слабкої.

Всесвіт існує в просторі та часі, властивостями яких пояснюється існування фундаментальних законів збереження — законів, яким підкоряються всі процеси будь-якого структурного рівня Всесвіту. До таких законів належать, наприклад, закон збереження і перетворення енергії та закон збереження імпульсу.

Кожна фізична теорія має межі застосування. З появою нових знань створюється нова теорія, яка зазвичай містить попередню теорію як складову.



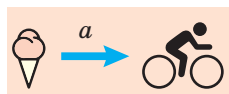
### Контрольні запитання

1. Наведіть приклади об'єктів кожного зі структурних рівнів Всесвіту.
2. Яка теорія переважно описує мікросвіт? макросвіт? мегасвіт?
3. Чому кожна фізична теорія має межі застосування?
4. Які фундаментальні взаємодії ви знаєте? Наведіть приклади їх проявів.
5. З якою властивістю простору або часу пов'язаний закон збереження і перетворення енергії? закон збереження імпульсу?
6. Які існують види енергії?
7. Наведіть приклади проявів закону збереження та перетворення енергії.

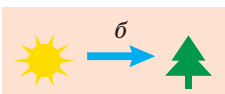


### Вправа № 39

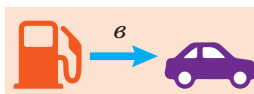
1. Серед корисних господарських порад є така: якщо ви взимку зберігаєте картоплю на лоджії, то, щоб картопля не замерзла, в ящику, де вона зберігається, слід прилаштувати електричну лампу розжарення та періодично її вмикати. Навіщо? Хіба в темряві холодніше, ніж на світлі?
2. На рис. 1 подано декілька прикладів перетворення енергії. Який вид енергії на який перетворюється в кожному випадку?
3. Які перетворення енергії відбуваються під час запуску на орбіту космічного корабля? підйому ліфта? забивання цвяха в дошку?
4. Скориставшись даними рис. 2, визначте ККД автомобіля.



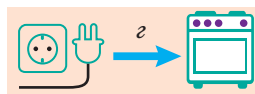
Їжа дає енергію для руху людини



Сонце дає енергію рослині



Паливо дає енергію автомобілю



Увімкнена електроплита нагрівається

Рис. 1

- У ході об'єднання двох частинок виникла складніша частинка, при цьому виділилася певна енергія  $E$  (рис. 3, а). Складну частинку зруйнували, тобто відновили початковий стан (рис. 3, б). Вивільнилася чи поглинулася при цьому енергія? Скільки енергії вивільнилося або поглинулося?
- Скориставшись радіоактивним рядом Торію (див. рис. 23.9), запишіть одну реакцію  $\beta$ -розпаду та одну реакцію  $\alpha$ -розпаду. Доведіть, що під час цих реакцій виконується закон збереження електричного заряду.

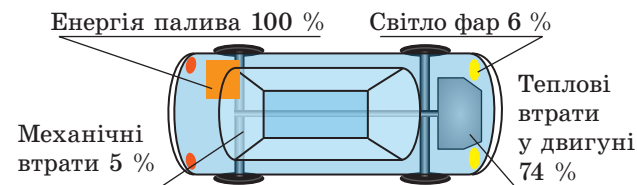


Рис. 2

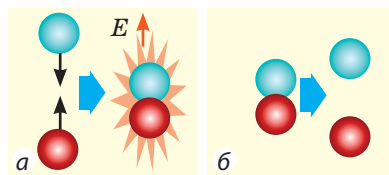


Рис. 3



### Експериментальне завдання

Скориставшись гімнастичним обручем, мотузкою, вимірювальною стрічкою та секундоміром, доведіть правдивість закону збереження механічної енергії.

- Виміряйте довжину обруча й підвісьте його так, щоб точки підвісу були у вершинах правильного трикутника (рис. 4).
- Закрутіть обруч так, щоб мотузка у верхній частині мала круту скрутку.
- Виміряйте висоту  $h$ , на яку при цьому піднявся обруч.
- Відпустіть обруч — він почне обертатися. Коли швидкість обертання обруча наблизитиметься до максимальної (мотузка майже повністю розкрутиться), визначте швидкість руху точок обруча. Для цього виміряйте час п'яти повних обертів, обчисліть період обертання  $T$  і скористайтеся формулою  $v=l/T$ , де  $l$  — довжина обруча.
- Знайдіть відношення кінетичної енергії руху точок обруча до потенціальної енергії піднятого обруча. Зробіть висновок.



Рис. 4

### Фізика і техніка в Україні



**Віктор Михайлович Глушков** (1923–1982) — всесвітньо відомий український учений, академік, автор фундаментальних праць у галузі кібернетики, математики та обчислювальної техніки, засновник і перший директор Інституту кібернетики НАНУ, який сьогодні носить його ім'я.

Перші розробки Інституту кібернетики — ЕОМ «Київ» і універсальна керуюча машина «Дніпро», яка була гідним конкурентом найкращим американським аналогам. Першою машиною для інженерних розрахунків стала ЕОМ «Промінь» зі ступеневим мікропрограмним керуванням, наступними — унікальні обчислювальні системи «МИР-1», «МИР-2», «МИР-3». Згодом ідеї Глушкова були реалізовані його учнями в ході створення найбільш швидкодіючих на той час систем ЕС-2701 і ЕС-1766 з номінальною продуктивністю понад 1 млрд операцій за секунду.

За ініціативою В. М. Глушкова в 1969 р. на базі Київського університету ім. Тараса Шевченка було відкрито факультет кібернетики.

У 1982 р. НАНУ започаткувало премію ім. В. М. Глушкова за видатні наукові роботи в галузі кібернетики, загальної теорії обчислювальних машин і систем.

## § 40. ЕВОЛЮЦІЯ ФІЗИЧНОЇ КАРТИНИ СВІТУ. ФІЗИКА І НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС

Ви вивчаєте фізику три роки і вже ознайомились із основними розділами цієї науки — механікою, оптикою, електрикою та ін.; довідалися про те, що у фізиці називають законами; дізналися, як відбувається дослідження фізичних явищ. Ми постійно нагадували вам, яким чином досягнення вчених-фізиків втілювалися в приладах, машинах, обладнанні, значно підвищуючи якість життя людини. Проте бурхливий розвиток техніки має й негативні наслідки. Настав час обговорити питання еволюції фізичної картини світу та взаємозв'язку фізики й суспільного розвитку.

### 1 Дізнаємося про еволюцію фізичної картини світу

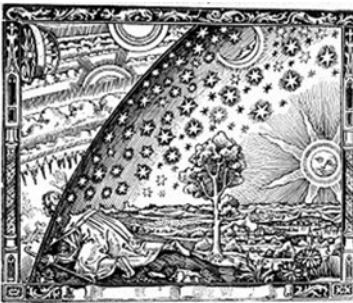


Рис. 40.1. Давні уявлення про будову світу (гравюра)

Протягом тисячоліть людину цікавили питання: що являє собою навколишній Всесвіт? як він «побудований»? за якими законами розвивається?

Стародавні філософи визнавали Землю центром усього Всесвіту. Вони вважали, що вона плоска й оточена гігантською кришталевою сферою (рис. 40.1).

У Середні віки завдяки вченням Галілео Галілея і Миколая Коперника була сформована *геліоцентрична картина світу* — вчення, відповідно до якого Сонце розташоване в центрі Всесвіту, а всі тіла, в тому числі планети (і зокрема Земля), обертаються навколо Сонця.

За останні 100 років знання людства про Всесвіт значно поглибилися. *Загальна теорія відносності* Альберта Ейнштейна пояснила існування багатьох загадкових об'єктів Всесвіту, наприклад чорних дір. Завдяки радіотелескопам, які працюють в багатьох діапазонах електромагнітних хвиль, розширилися можливості отримання інформації про космічний простір.

Космічні апарати пролетіли повз усі планети Сонячної системи, сфотографували їхні поверхні «зблизька», побували на Марсі, Венері, Місяці, на інших небесних тілах. Із 1990 р. на орбіті Землі працює телескоп «Габбл», завдяки якому вдалося «побачити» об'єкти в далеких галактиках (рис. 40.2).

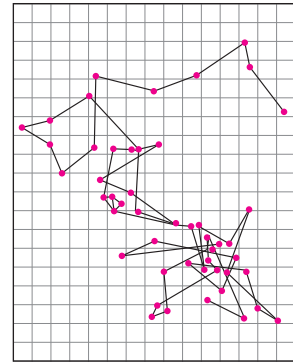
Паралельно з вивченням об'єктів мега- і макросвіту вчені досліджували світ молекул, атомів та їхніх складників — мікросвіт.



Рис. 40.2. За допомогою космічного телескопа вдалося сфотографувати Туманність Орла — скупчення зір, яке розташоване на відстані 7000 світлових років від Землі

Первісні уявлення про будову атомів виникли приблизно 2,5 тисячі років тому. Вони були уможливлені та ґрунтувалися тільки на логічних міркуваннях філософів Давньої Греції. У XIX ст. з'явилися непрямі докази атомарної будови матерії, які базувалися, зокрема, на унікальних (але непрямих) експериментах (рис. 40.3).

Тільки наприкінці XIX — на початку XX ст. з'явилися незаперечні докази *атомно-ядерної структури матерії* (рис. 40.4). За допомогою новітніх надчутливих мікроскопів, які було створено наприкінці минулого століття (тонельний, автоелектронний, автойонний, електронний), удалося сфотографувати окремі атоми (рис. 40.5).



**Рис. 40.3.** Копія малюнка французького фізика Жана Батиста Перрена (1870–1942), на якому відтворено результати спостереження в мікроскоп броунівської частинки — дрібної частинки речовини, завислої в рідині. Броунівський рух частинок, викликаний хаотичними ударами по них молекул, підтверджує атомарну будову матерії

## 2 Знайомимося з розвитком уявлень про природу світла

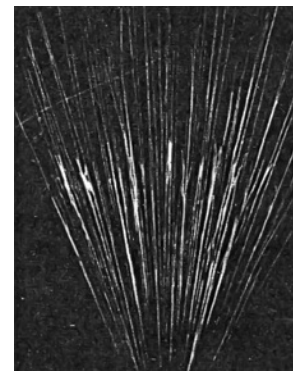
Від часів давньогрецького філософа Арістотеля до наших днів фізична наука намагається створити цілісну картину світу. Із самого початку вивчення природи дослідники прагнули знайти єдину теорію, яка б описувала і мега-, і макро-, і мікросвіт.

Перша єдина ланка з'явилася на межі XVII–XVIII ст. у ході вивчення природи світла. Майже одночасно два видатні фізики створили дві абсолютно різні теорії світла. Ідеться про корпускулярну теорію *І. Ньютона* і хвильову теорію *К. Гюйгенса*.

Згідно з *корпускулярною теорією Ньютона* світло — це потік частинок (*корпускул*), що випускаються світними тілами, причому рух світлових корпускул підпорядковується законам механіки. Так, відбиття світла Ньютон пояснював відбиванням корпускул від поверхні, на яку падає світло, а заломлення світла — зміною швидкості руху корпускул унаслідок їх взаємодії з частинками середовища.

«Трактат про світло» Гюйгенса, опублікований у 1690 р., увійшов в історію науки як перша наукова праця з *хвильової оптики*.

Хвильову теорію світла підтримували такі видатні вчені, як М. В. Ломоносов і Л. Ейлер, проте до кінця XVIII ст. загальноновизнаною лишалася корпускулярна теорія Ньютона. Так було до початку XIX ст., доки не з'явилися роботи англійського фізика *Томаса Юнга* (1773–1829) і французького фізика *Огюстена Жана Френеля* (1788–1827). Досліджуючи світло, вчені спостерігали явища, властиві



**Рис. 40.4.** Сліди  $\alpha$ -частинок у пристрої для реєстрації заряджених частинок (камері Вільсона)



**Рис. 40.5.** Електронний мікроскоп

лише хвилям: огинання світлом перешкод (дифракція) та посилення й послаблення світла в разі накладання світлових пучків (інтерференція). З того часу в науці стала переважати *хвильова теорія Гюйгенса*.

У 60-х роках XIX ст. *Дж. Максвелл* створив теорію електромагнітного поля, одним із наслідків якої було встановлення можливості існування електромагнітних хвиль. За розрахунками, швидкість поширення електромагнітних хвиль дорівнювала швидкості світла. На основі теоретичних досліджень Максвелл дійшов висновку, що *світло — це електромагнітні хвилі*. Після дослідів *Г. Герца* жодних сумнівів щодо *електромагнітної природи світла* не залишилось.

Електромагнітна теорія світла дозволила пояснити багато оптичних явищ, однак уже на кінець XIX ст. з'ясувалося, що цієї теорії недостатньо для пояснення явищ, які виникають під час взаємодії світла з речовиною. Так, процеси випромінювання та поглинання світла, явище фотоефекту та ін. змогли пояснити тільки в першій половині XX ст. — з позицій *квантової теорії світла*, згідно з якою світло випромінюється, поширюється та поглинається речовиною не безперервно, а скінченними порціями — *квантами*. Кожен окремих квант світла має властивості частинки, а сукупність квантів поводить подібно до хвилі. Така двоїста природа світла (та й будь-якої частинки) отримала назву *корпускулярно-хвильовий дуалізм*.

Таким чином, через кілька сотень років дві абсолютно різні теорії «об'єдналися». Паралельно з'являлися й інші єднальні ланки. Коли вчені почали вивчати фізичні процеси, що відбуваються в зорях, то виявилось, що «світіння» цих гігантських скупчень пов'язане зі структурою й властивостями найменших із відомих на той час об'єктів — атомних ядер. Тож гігантські прискорювачі, створені для вивчення мікроструктури матерії, дали відповідь не тільки на запитання «Якою є структура атомного ядра?», але й на інше: «Чому світить Сонце?».

Учені впевнені: ще більше загадок Всесвіту буде розгадано після одержання відомостей про властивості елементарних частинок. Із цією метою був створений найпотужніший із прискорювачів — *великий адронний колайдер* (див. [рис. 22.1](#)). Його було запущено в 2008 р. зусиллями вчених багатьох країн.

### **3 Підсумовуємо роль фізики в науково-технічному прогресі**

*Науково-технічний прогрес* — це єдиний, взаємозумовлений, поступовий розвиток науки та техніки.

У курсі фізики 9 класу, як і раніше, ми неодноразово звертали вашу увагу на тісний зв'язок між фізикою і технікою. Протягом майже 25 століть

існування фізичної науки результати її досліджень були спрямовані не тільки на пояснення природи світобудови. У своїх працях учені-фізики (наприклад, давні греки, насамперед *Архімед*) постійно намагалися науково обґрунтувати застосування тих чи інших технічних пристроїв і прийомів.

У XIX ст. з'явилася нова тенденція: фізичні закони почали не тільки застосовуватися для пояснення (і поліпшення) вже винайдених інженерами конструкцій, але й бути «поживою для розуму» в процесі створення нових напрямків розвитку техніки. Наведемо кілька прикладів.

До XIX ст. електрика слугувала здебільшого для салонних розваг (рис. 40.6). Приблизно в середині XIX ст., після встановлення фізичних законів, пов'язаних із поширенням і дією електричного струму (закону Ома, закону електромагнітної індукції та ін.), починає розвиватися телеграфний зв'язок, а потім і телефонний. Винайдення й широке розповсюдження радіо стали можливими після створення *теорії електромагнітного поля Максвелла*.

У XIX ст. встановлення нових фізичних законів відбувалося, як правило, випадково. Відповідно поява пов'язаних із цими законами нових технічних винаходів ішла самопливом, і лише у XX ст. цей процес було певним чином упорядковано. Ціла низка проектів (найвідоміший із них — так званий «*Урановий проект*» — програма робіт зі створення атомної зброї) здійснювалася на пряме замовлення урядів країн. У рамках кожного проекту вели наукові дослідження, за результатами яких виконували інженерні розробки (розрахунки, виготовлення конструкцій).

Сучасний етап розвитку фізики характеризується її тісним зв'язком із виробництвом і бізнесом. Для вирішення кожного нового технічного завдання залучають не тільки інженерів, технологів, а й науковців. Приклад такого співробітництва — мініатюризація мобільних телефонів.

Фізика вплинула також на розвиток інших наук. Насамперед це пов'язане із глибоким розумінням структури матерії, яке ґрунтується на теоретичному описі мікросвіту за допомогою квантової механіки. Застосування цієї теорії для вирішення завдань хімії та біології дозволило за короткий термін досягти суттєвого прогресу в розвитку цих галузей знань.

Практично всі сучасні вимірювальні прилади й методи вимірювання, застосовувані в астрономії, медицині, археології і т. д., «виростили» з відповідних законів фізики.



**Рис. 40.6.** Дослід, що демонструє існування провідників і діелектриків (гравюра середини XVIII ст.). Жінка сидить на гойдалці, підвішеній на шовкових нитках. Чоловік, який стоїть праворуч, наближає наелектризовану скляну паличку до руки жінки, а той, що стоїть ліворуч, торкається до її другої руки — з'являється іскра



### Підбиваємо підсумки

За майже 2500 років свого існування фізична наука змогла розвинути загальне уявлення про природу, яке об'єднує знання людей про мега-, макро- і мікросвіт. Значні зусилля вчених-фізиків були спрямовані на практичне втілення результатів своїх досліджень.

Починаючи з XIX ст. фізики стали не тільки пояснювати відомі факти, але й установлювати нові закони і, спираючись на них, розвивати нові галузі техніки.

Особливістю сьогодення є «замовлення на розробку»: наукові дослідження здебільшого здійснюються спеціально для розв'язання конкретного практичного завдання.

Результати, отримані вченими-фізиками, застосовують в інших науках, зокрема в біології та хімії. Фізичні прилади й методи досліджень широко використовують у науці, промисловості, сільському господарстві.



### Контрольні запитання

**1.** За допомогою яких приладів вивчають мегасвіт? **2.** Які методи й прилади використовують фізики для вивчення властивостей атомів? **3.** Якими є сучасні уявлення про природу світла? **4.** У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму? **5.** Наведіть докази того, що знання закону Ома є необхідним для інженерів.

### Фізика і техніка в Україні



**Борис Ієремієвич Веркін** (1919–1990) — видатний український учений у галузі фізики низьких температур, засновник і перший директор *Фізико-технічного інституту низьких температур АН УРСР* (м. Харків) (ФТІНТ).

Наукові праці Б. І. Веркіна присвячені дослідженню природи магнітних властивостей металів, фундаментальної та прикладної надпровідності, структури матеріалів за низьких температур, властивостей криогенних кристалів і рідин, молекулярної біофізики, поведінки рідини в умовах невагомості. Значним є внесок ученого в дослідження космосу: за його участі було створено комплекс приладів, установлених на космічних апаратах «Венера-9», «Венера-10», «Салют-4» для імітації фізичних умов Місяця, Марса та інших планет.

У царині криогенної медицини Б. І. Веркін розробив методи довготривалої низькотемпературної консервації клітин крові, тканин і кісткового мозку, а також кріохірургічні інструменти й апарати для застосування в дерматології, гінекології, стоматології, нейрохірургії та інших галузях медицини.

За видатні наукові досягнення Фізико-технічному інституту низьких температур присвоєно ім'я Б. І. Веркіна. НАНУ засновано премію ім. Б. І. Веркіна за видатні наукові роботи в галузі фізики й техніки низьких температур.



## Освоєння космосу

### Перші кроки в космос

4 жовтня 1957 р. радянські вчені вивели на навколоземну орбіту перший штучний супутник Землі, який відкрив космічну еру в історії людства (рис. 1). Після відділення від ракети-носія його радіопередатчик почав передавати перший штучний сигнал із космосу — і цей сигнал почув увесь світ.



Рис. 1



Рис. 2

12 квітня 1961 р. людина вперше полетіла в космос. Цей політ здійснив на космічному кораблі «Восток» радянський космонавт *Юрій Олексійович Гагарін* (1934–1968) (на рис. 2 ліворуч). «Восток» був розроблений видатним конструктором *Сергієм Павловичем Корольовим* (1907–1966) (на рис. 2 праворуч), уродженцем м. Житомира, випускником Київського політехнічного інституту.

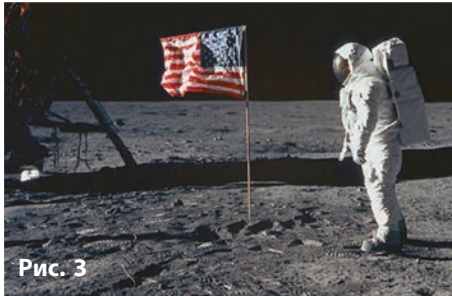
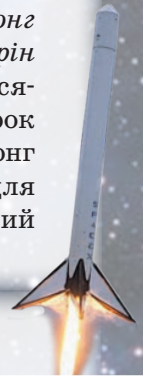


Рис. 3

21 липня 1969 р. американські астронавти *Ніл Армстронг* (1930–2012) і *Базз (Едвін) Олдрін* (народ. 1930) висадилися на Місяці (рис. 3). Зробивши перший крок місячною поверхнею, Н. Армстронг сказав: «Це маленький крок для однієї людини, але величезний стрибок для всього людства».



### Проект «Розетта»

Ідея проекту полягала в тому, щоб посадити космічний апарат на комету. Космічний зонд «Розетта», створений фахівцями Європейського космічного агентства, був запущений у 2004 р. і за десять років подолав сотні мільйонів кілометрів, щоб вийти на орбіту комети розміром менш ніж 10 км (!). Із «Розетти» було спущено апарат «Філі», який 12 листопада 2014 р. успішно здійснив м'яку посадку на поверхню комети (рис. 4). Залишається додати, що «Розетта» досліджувала комету Чурюмова — Герасименко, відкриту в 1969 р. ученим із України *Климом Івановичем Чурюмовим* (1937–2016).

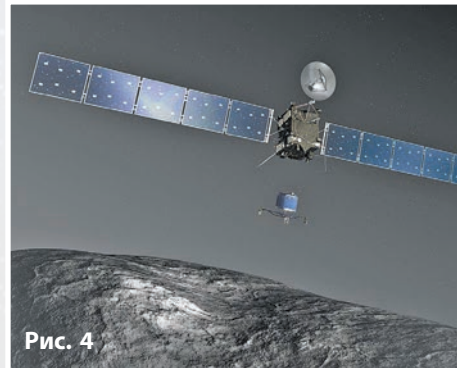


Рис. 4

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ V «Рух і взаємодія. Закони збереження»

1. Вивчаючи розділ V, ви згадали *основні поняття механіки* (механічний рух, траєкторія, шлях, переміщення, система відліку), дізналися про *рівноприскорений прямолінійний рух*, навчилися визначати *фізичні величини*, що його характеризують.

### РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

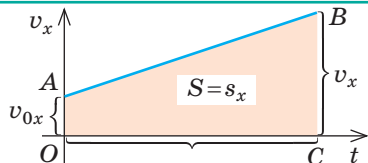
рух, під час якого тіло рухається прямолінійною траєкторією з незмінним за модулем і напрямком прискоренням

#### Фізичні величини

Прискорення [a] = 1 м/с <sup>2</sup>	Швидкість руху [v] = 1 м/с	Переміщення [s] = 1 м	Координата [x] = 1 м
$\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$ $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$	$\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t$ $v_x = v_{0x} + a_x t$	$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$	$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$

Геометричний зміст переміщення:

$$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot t$$



2. Ви вивчили найважливіші закони динаміки — *закони Ньютона*, навчилися розрізняти *інерціальні й неінерціальні системи відліку*.

### РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

Перший закон Ньютона	Другий закон Ньютона	Третій закон Ньютона
Існують такі системи відліку, що називаються <i>інерціальними</i> , відносно яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на тіло не діють жодні сили або якщо ці сили скомпенсовані	Прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла: $\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m}$	Тіла взаємодіють одне з одним із силами, які напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком: $\bar{F}_1 = -\bar{F}_2$

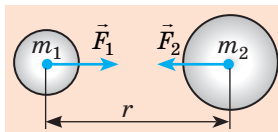
3. Ви поглибили свої знання про *гравітаційну взаємодію*, вивчили *закон всесвітнього тяжіння* й отримали *формулу для визначення сили тяжіння*.

### ГРАВІТАЦІЙНІ СИЛИ

#### Сила всесвітнього тяжіння

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

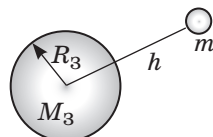
$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$



#### Сила тяжіння

$$F = G \frac{m M_3}{(R_3 + h)^2}$$

$$F = mg$$



4. Ви з'ясували, що рух тіла тільки під дією сили тяжіння називають *вільним падінням*, а прискорення, з яким рухаються тіла під дією сили тяжіння, — *прискоренням вільного падіння*.

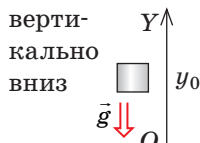
### ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

#### Формула

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2 \text{ — біля поверхні Землі}$$

#### Напрямок



#### Залежить

- від висоти тіла над поверхнею Землі;
- від географічної широти місцевості

#### Не залежить

- від маси тіла;
- від значення та напрямку швидкості руху тіла

5. Ви згадали *закон збереження механічної енергії*, довідалися про *закон збереження імпульсу*.

### ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

#### Закон збереження механічної енергії

У замкненій системі тіл, які взаємодіють тільки силами пружності та силами тяжіння, повна механічна енергія зберігається:

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$$

#### Закон збереження імпульсу

У замкненій системі тіл векторна сума імпульсів тіл залишається незмінною після будь-яких взаємодій тіл цієї системи між собою:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$$

6. Ви узагальнили свої знання про *фундаментальні взаємодії в природі*, дізналися про *фундаментальний характер законів збереження*.

### ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

Гравітаційна

Електромагнітна

Сильна

Слабка

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ V «Рух і взаємодія. Закони збереження»

Завдання 1–7 містять тільки одну правильну відповідь.

- (1 бал) Тіло рухається вздовж осі  $OX$ . На рис. 1 наведено графік залежності проекції швидкості руху цього тіла від часу спостереження. Яка ділянка графіка відповідає рівномірному руху тіла?  
а) ділянка  $AB$ ;  
б) ділянка  $BC$ ;  
в) ділянка  $CD$ ;  
г) ділянки  $AB$  і  $CD$ .

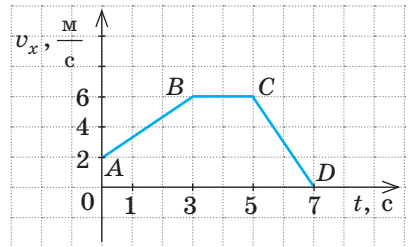


Рис. 1

- (1 бал) Яка з поданих фізичних величин є скалярною?  
а) прискорення; б) швидкість руху; в) імпульс; г) енергія.
- (1 бал) З яким тілом слід пов'язати систему відліку, щоб вона була інерціальною?  
а) потяг набирає швидкість;  
б) дівчинка гойдається на гойдалці;  
в) хлопчик рухається дорогою прямолінійно з незмінною швидкістю;  
г) собака сповільнює свій рух.
- (1 бал) Тіло, кинуте вертикально вгору, рухається лише під дією сили тяжіння. Прискорення руху тіла:  
а) найбільше в момент початку руху;  
б) однакове в будь-який момент руху;  
в) найменше в найвищій точці траєкторії;  
г) збільшується під час падіння.
- (2 бали) З яким прискоренням рухається тіло, якщо протягом 2 с швидкість його руху збільшується від 3 до 6 м/с?  
а)  $1,5 \text{ м/с}^2$ ; б)  $3 \text{ м/с}^2$ ; в)  $4,5 \text{ м/с}^2$ ; г)  $6 \text{ м/с}^2$ .
- (2 бали) Автомобіль починає рух і протягом 5 с рухається з незмінним прискоренням  $4 \text{ м/с}^2$ . Визначте переміщення автомобіля за цей час.  
а) 10 м; б) 20 м; в) 50 м; г) 100 м.
- (2 бали) На рис. 2 зображено чотири ситуації взаємодії двох тіл. У якому випадку систему тіл не можна вважати замкненою?

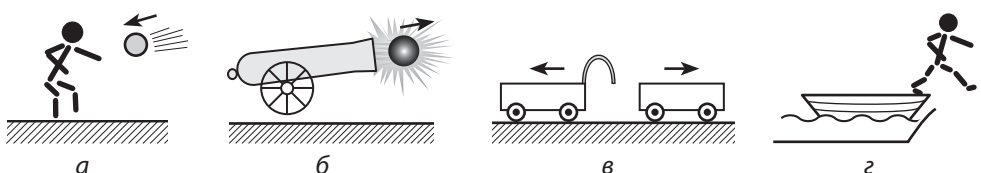


Рис. 2

8. (3 бали) Тіло масою 100 г рухається під дією двох взаємно перпендикулярних сил значеннями 6 і 8 Н. Із яким прискоренням рухається тіло?
9. (3 бали) За графіком, наведеним на рис. 1, визначте переміщення тіла за весь час спостереження. Вважайте, що в обраній системі відліку тіло рухалося вздовж осі  $OX$ .
10. (3 бали) Тіло кинули вертикально вгору зі швидкістю 30 м/с. Через який інтервал часу тіло опиниться на відстані 25 м від точки кидання? Якою буде швидкість руху тіла через цей інтервал часу?
11. (3 бали) На підлозі ліфта стоїть валіза масою 20 кг. Ліфт починає рухатися з прискоренням 2 м/с<sup>2</sup>. Чому дорівнює вага валізи? Розгляньте два варіанти.
12. (4 бали) Тіло масою 2,5 кг рухається вздовж осі  $OX$ . Рівняння руху тіла має вигляд:  $x = 15 + 3t - t^2$ . Установіть для цього випадку відповідність між фізичною величиною та її значенням в СІ.
- |  |       |
|--|-------|
| 1 Сила, яка діє на тіло  | А 0   |
| 2 Імпульс тіла на початок спостереження                          | Б 1,5 |
| 3 Кінетична енергія тіла через 1,5 с після початку спостереження | В 4,5 |
| 4 Час руху тіла до зупинки                                       | Г 5   |
|  | Д 7,5 |

13. (4 бали) Брусок масою 500 г під дією підвищеного до нього тягаря масою 150 г подолав від початку руху шлях 80 см за 2 с (рис. 3). Знайдіть коефіцієнт тертя ковзання.

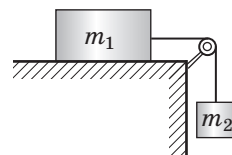


Рис. 3

14. (4 бали) Із точки, розташованої на висоті 2,8 м над поверхнею землі, вертикально вгору кинули тіло 1 зі швидкістю 12 м/с. У момент, коли тіло 1 досягло найвищої точки підняття, з поверхні землі зі швидкістю 10 м/с кинули вгору тіло 2. Визначте час і висоту зустрічі тіл.

15. (4 бали) Скориставшись даними рис. 4, визначте висоту  $h$ , на яку піднімуться два тіла однакової маси після зіткнення. Внутрішню поверхню циліндра вважайте ідеально гладенькою.

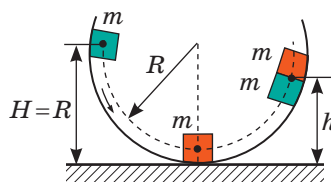


Рис. 4

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## Орієнтовні теми проектів

1. Закони збереження у природі, техніці, побуті.
2. Фізика в житті сучасної людини.
3. Сучасний стан фізичних досліджень в Україні та світі.
4. Україна — космічна держава.
5. Застосування закону збереження імпульсу в техніці.

## Теми рефератів і повідомлень

1. Роль законів Ньютона в розвитку фізики.
2. Сила тяжіння на планетах Сонячної системи та їхніх супутниках.
3. Чи існує відцентрова сила.
4. Як рухається тіло, кинуте під кутом до горизонту, якщо опором повітря знехтувати не можна.
5. Реактивний рух у природі.
6. Історія космонавтики.
7. Перший український космонавт.
8. Життєвий шлях і наукова діяльність С. П. Корольова.
9. Міжнародний космічний проект «Галілео».
10. Закони збереження у Всесвіті.
11. Енергія фізичного вакууму.
12. Чому масу називають мірою енергії.

## Теми експериментальних досліджень

1. Експериментальна перевірка другого закону Ньютона.
2. Експериментальна перевірка третього закону Ньютона.
3. Вивчення умови рівномірного прямолінійного руху тіла під дією декількох сил.
4. Дослідження додавання сил.
5. Вивчення дальності польоту тіла.
6. Створення і спостереження реактивного руху.
7. Дослідження пружного та непружного ударів.
8. Виготовлення приладів, дія яких ґрунтується на законі збереження енергії.

## ФІЗИКА ТА ЕКОЛОГІЯ. АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Уявіть, що ви на тиждень опинилися без усіх сучасних здобутків цивілізації. Ви не можете спілкуватися зі своїми друзями по мобільному телефону і в Інтернеті, ваша квартира не опалюється, не подається електрика, ви не можете скористатися транспортом...

Можливість користуватися здобутками, що дали нам фізика й техніка, — це безперечний плюс. Але, на жаль, є й мінус. Швидкий розвиток техніки, яка потребує все більше й більше енергії, виснаження запасів корисних копалин, повсюдне використання синтетичних матеріалів, будівництво споруд і магістралей із залізобетону та ін. — усе це призводить до значного погіршення екологічної ситуації. Фізика і проблеми екології — тема нашого останнього в цьому навчальному році уроку.

### 1 Дізнаємося про різні типи і види забруднення довкілля

Існують два типи забруднень: *природні* й *антропогенні*.

? Спробуйте навести 2–3 приклади кожного типу забруднень.

У кожному із зазначених типів можна виділити такі види забруднень: *хімічне, біологічне, механічне* (рис. 1, 2), *фізичне забруднення*. Зрозуміло, що негативний вплив речовин-забруднювачів, а також випромінювань залежить від їхньої концентрації, стійкості (часу їхнього існування), хімічної та радіаційної активності.

Ми зупинимося на *антропогенному фізичному забрудненні довкілля*, а саме на *тепловому, шумовому, радіоактивному та електромагнітному забрудненнях*. Зазначимо, що на кожен з цих форм забруднень ми вже звертали увагу під час вивчення відповідних тем.

### 2 Згадуємо про теплове забруднення

Теплове забруднення передусім пов'язане з *парниковим ефектом*. Для роботи промисловості, транспорту, отримання електричної енергії, опалювання приміщень людство спалює величезну кількість вугілля, нафти та газу. При цьому в атмосферу викидається вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), який стає своєрідним дзеркалом, що відбиває теплове випромінювання, яке йде від Землі. У результаті частина енергії затримується в атмосфері та збільшує її температуру. Через парниковий ефект середня температура



Рис. 1. Сміття, що потрапляє в океан, призводить до зниження природного планктону, який виробляє до 50 % кисню, що є в атмосфері Землі



Рис. 2. Смог (дим, пил, туман), який утворюється у великих містах, призводить до отруєння людини зсередини, збільшує кількість опадів, заважає проникненню сонячних променів



**Рис. 3.** За даними супутникових радарів, кожні 10 років висота шельфових льодовиків у морях Беллінсгаузена та Амундсена (Антарктида) зменшується в середньому на 740–1920 см

поверхні Землі підвищилася на 0,7 °С. Таке нагрівання вже спричинило глобальні зміни клімату, які супроводжуються великими зливами та посухами. Із глобальним потеплінням пов'язане танення льодовиків в Арктиці й Антарктиці (рис. 3), підвищення рівня Світового океану тощо.

Джерелами теплового забруднення є також теплотраси, підземні газопроводи, теплоелектростанції, які для зливу гарячої води використовують водойми. Нагрівання водойм, у свою чергу, призводить до зменшення в них розчиненого кисню (адже зі збільшенням температури розчинність газів зменшується), що спричиняє ріст синьо-зелених водоростей (рис. 4), які, до речі, також поглинають кисень.

**?** А от на запитання «До чого приводить недостатність кисню у водоймі?» спробуйте відповісти самостійно.



**Рис. 4.** Синьо-зелені водорості, що розростаються в теплій воді, активно поглинають кисень

### **3 Боремось із шумовим забрудненням**

Шум у 20–30 децибелів (дБ) є майже нешкідливим для людини. А от шум більшої потужності призводить до погіршення слуху, збільшує кров'яний тиск, негативно впливає на серцево-судинну систему, може викликати нервові та психічні розлади.

Найбільш потужним і поширеним джерелом шуму є транспорт, на який припадає 60–80 % усіх шумів у місцях перебування людей. Рівень шуму, створюваний автомобільним транспортом, може становити 75–85 дБ, залізничним та авіаційним — понад 100 дБ.

Ураховуючи, що для людини не є шкідливим шум лише 20–30 дБ, можна усвідомити, якого негативного впливу зазнають люди, котрі мешкають, наприклад, біля великих магістралей, залізниць, аеропортів.

Таким чином, боротьба з транспортним шумом (див. рис. 5, 6) має суттєве значення і здійснюється в кількох напрямках: створення мал шумних транспортних засобів, покращення покриття доріг, продумане розташування та обладнання магістралей (кільцеві дороги, об'їзди, зелені насадження, шумозахисні екрани), певні організаційні засоби



**Рис. 5.** Вимірювання рівня шуму від глушника автомобіля



(заборона польотів літаків над великими містами, обов'язкова наявність глушників, заборона звукових сигналів тощо).

**?** Які ще джерела шуму, крім транспорту, ви знаєте? Як від цього шуму можна себе захистити?



**Рис. 6.** Шумозахисні екрани, встановлені біля трас, зменшують рівень шуму в декілька разів

#### **4** Згадуємо про радіаційне й електромагнітне забруднення

Із розділу III ви дізналися про *електромагнітне забруднення*, із розділу IV — про *радіаційне*. Згадаємо основні джерела цих забруднень, наслідки негативного впливу радіоактивного та електромагнітного випромінювань на людину, визначимо, як запобігти цим наслідкам.

	Радіаційне забруднення	Електромагнітне забруднення
Джерела забруднення	Аварії на атомних електростанціях. Рентгенівські та $\gamma$ -дослідження. Лікування $\gamma$ -випромінюванням (хімотерапія). Теригенне (земне) випромінювання (щєбінь, керамзит, граніт; радон, який виходить із надр Землі та накопичується в підвалах)	Високовольтні лінії електропередачі. Теле- і радіостанції. Мобільні телефони. НВЧ-печі. Електростанції. Трансформаторні станції. Комп'ютери
Негативний вплив	Руйнує клітини організму. Впливає на спадковість. Ушкоджує молекули ДНК, що призводить до злоякісних пухлин. Спричиняє променеву хворобу	Збільшує стомлюваність. Спричиняє нервові порушення. Збільшує ймовірність безпліддя. Може призвести до пухлини мозку. Знижує імунітет
Засоби боротьби	Проходити рентгенівське дослідження не частіше ніж один раз на рік. Не перебувати в зоні радіаційного забруднення. Регулярно провітрювати приміщення. Менше часу перебувати в закритих приміщеннях, поблизу гранітних доріг	Зменшувати час використання безпроводних мереж. Використовувати переважно проводовий зв'язок. Не тримати мобільний телефон поблизу голови (використовувати навушники). Не носити мобільний телефон у кишені

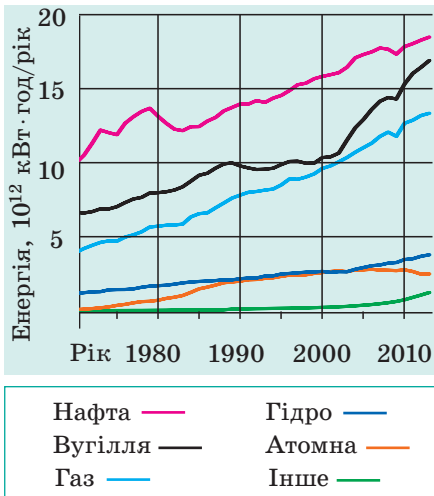


Рис. 7. Світове споживання енергії



Рис. 8. АЕС «Палюель» — найбільша атомна електростанція Франції



Рис. 9. Напівпровідникові сонячні панелі, встановлені на приватній ділянці

## 5 Дізнаємося про альтернативні джерела енергії

Протягом багатьох століть вуглеводневе паливо (дрова, вугілля, торф, газ, нафта) було майже єдиним джерелом енергії для людства, причому воно майже не завдавало шкоди довкіллю. Але за останнє сторіччя різко збільшилося використання теплових машин, які перетворюють енергію палива на механічну й електричну енергії. Це призвело, по-перше, до виснаження природних викопних ресурсів, по-друге, до глобальної зміни клімату Землі. На нинішньому етапі свого розвитку людство не може знизити кількість енергії, що споживає, — навпаки, ця кількість неухильно зростає, і, як і раніше, більша частина енергії виробляється за рахунок спалювання швидко вичерпуваних вуглеводневих видів палива (рис. 7).

Сучасний розвиток техніки дозволяє використовувати й **альтернативні джерела енергії**, а саме *ядерну енергію, енергію вітру й Сонця, енергію припливів і відпливів, геотермальну енергію Землі*. Наведемо декілька прикладів.

*Атомна енергетика Франції* має найбільший рівень використання атомної енергії в Європі: 78 % електроенергії, що виробляється в країні, походить саме з атомних електростанцій (рис. 8).

У багатьох країнах світу починає розвиватися *сонячна енергетика*. На енергії Сонця працюють і величезні електростанції, і невеликі сонячні панелі, що обслуговують приватні будинки. У техніці використовують два способи перетворення сонячної енергії на електричну: пряме перетворення за допомогою напівпровідникових пристроїв (рис. 9) і перетворення сонячної енергії спочатку на теплову, а потім на електричну (рис. 10).

Ще одним відновлюваним джерелом енергії є вітер. *Вітроенергетика* розвивається дуже швидко: хоч зараз

вітрогенератори виробляють лише 1 % електроенергії у світі, є країни, в яких частка вітроенергетики досить висока. Так, 42 % електроенергії Данії виробляється з використанням енергії вітру (рис. 11).

Потужним і практично невичерпним джерелом енергії є енергія припливів і відпливів. Першу припливну електростанцію було побудовано у Франції ще в 1966 р., вона мала потужність 240 МВт. Ця електростанція працює і нині. Сьогодні припливні електростанції є майже в усіх куточках нашої планети.

Країни, розташовані в районах вулканічної активності, можуть використовувати геотермальну енергію (енергію гарячої води, сухої та вологої пари, що піднімаються з надр Землі близько до поверхні). Геотермальну енергію активно використовують, наприклад, в Ісландії (рис. 12), на Філіппінах (27 % виробництва електричної енергії країни), у Мексиці, США.



### Підбиваємо підсумки

Швидкий розвиток техніки, повсюдне використання синтетичних матеріалів, спалювання величезної кількості вуглеводневого палива призводять до того, що екологічна ситуація на нашій планеті погіршується. Найбільше забруднення довкілля відбувається завдяки людині (антропогенне забруднення). Діяльність людини призводить до утворення островів сміття в океані (механічне забруднення), додаткового викидання тепла в атмосферу й водойми (теплове забруднення), суттєвого підвищення радіаційного фону (радіаційне забруднення). На здоров'я людини впливає також збільшення рівня шуму (шумове забруднення) і концентрації електромагнітного випромінювання (електромагнітне забруднення).

Збільшення концентрації вуглекислого газу в атмосфері Землі вже призвело до того, що середня температура планети підвищилася на 0,7 °С. Щоб зменшити кількість викидів і хоча б частково зберегти запаси корисних копалин, уряди країн підтримують використання альтернативних джерел енергії, а саме енергії Сонця й вітру, припливів і відпливів, ядерної та геотермальної енергії.



**Рис. 10.** Одна з найбільших сонячних електростанцій у світі — «Айванпа» (США, Каліфорнія). 173 тис. дзеркал відбивають сонячне світло та спрямовують його на вершини трьох веж, де встановлено котли з водою. Гаряча пара надходить на лопаті турбін, установлених усередині веж



**Рис. 11.** Вітрогенератори, встановлені вздовж узбережжя Данії, повністю задовольняють потреби півночі країни в енергії та дозволяють продавати електроенергію іншим країнам



**Рис. 12.** Теплопостачання столиці Ісландії Рейк'явіка повністю здійснюється від геотермальної станції, розташованої в 7 км від міста

## ПРЕФІКСИ ДЛЯ УТВОРЕННЯ НАЗВ КРАТНИХ І ЧАСТИННИХ ОДИНИЦЬ

Префікс	Символ	Множник	Префікс	Символ	Множник
тера-	Т	$10^{12}$	санти-	с	$10^{-2}$
гіга-	Г	$10^9$	мілі-	м	$10^{-3}$
мега-	М	$10^6$	мікро-	мк	$10^{-6}$
кіло-	к	$10^3$	нано-	н	$10^{-9}$
гекто-	г	$10^2$	піко-	п	$10^{-12}$
деци-	д	$10^{-1}$	фемто-	ф	$10^{-15}$

## ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ І ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

### Розділ І «Магнітне поле»

**№ 1. 1.** Зліва — південний, справа — північний. **2.** Два полюси. **4.** Підказка: провідники, в яких течуть струми одного напрямку, притягуються.

**№ 2. 1.** Для рис. *a*: 1) однорідне, 2) *A* і *B* — вгору, 3) однакова в точках *A* і *B*; для рис. *б*: 1) однорідне, 2) *A* і *B* — до нас, 3) однакова в точках *A* і *B*; для рис. *в*: 1) неоднорідне, 2) *A* — наліво вгору, *B* — зліва направо. **3.** 1) Так; 2) *B* — уліво вгору, *C* — уліво вниз; 3) у точці *C*; 4) від *S* до *N*.

**№ 3. 1.** Від *B* до *A*. **2.** 1) проти ходу годинникової стрілки; 2) від нас; 3) *a* — однакове, *b* — у точці *A*. **3.** Південним; так. **4.** Опуститься. **5.** Зліва «+», справа «-».

**№ 4. 1.** а) угору; б) зліва направо; в) зліва направо; г)  $F_A = 0$ . **2.** 1,08 Н; 0. **3.** а) унизу — північний; б) ліворуч — позитивний. **4.** а) 1,2 м; б) 30 мН. **6.** а) зліва направо, б) 0,25.

**№ 5. 1.** Магнітожорстка. **2.** а) властивості парамагнетиків; б) властивості феромагнетиків. **3.** Незначно зменшилось. **5.** Помістити в потужне магнітне поле.

**№ 6. 1.** Він залишиться намагніченим після вимкнення струму; буде витрачатися додаткова енергія на перемагнічення. **2.** Зліва — північний полюс. **3.** До *B* і *C*. **4.** Збільшиться.

**№ 7. 1.** За ходом годинникової стрілки. **2.** Опір вольтметра є величезним. **3.** Прилад вийде з ладу.

**№ 8. 1.** Якщо струм у зовнішній котушці змінюється. **2.** 1) а) віштовхнеться від магніту; б) притягнеться; в) відштовхнеться; 2) Струм напрямлений по передній стінці: а) униз; б) угору; в) угору. Напрямок індукції магнітного поля: а) зліва направо; б) справа наліво; в) справа наліво; 3) Кільце залишиться нерухомим. **3.** По передній стінці котушки: 1) униз, 2) угору, 3) униз, 4) угору.

### Завдання для самоперевірки до розділу І

1. а. 2. в. 3. 1—В, 2—Б, 3—А, 4—Д. 4. а, в. 5. в. 6. б. 7. а. 8. Щоб вилучити металеві предмети. 9. Справа «+». 10. Справа «+». 11. Уверху — північний. 12. Залізний — так; мідний — ні. 13. Унизу — північний; послабиться. 14. По передній стінці котушки вниз. 15. 0,7 Н.

**Розділ II «Світлові явища»**

№ 9. 1. 1—Г, 2—В, 3—Б. 2. а) Місяць; б) екран комп'ютера; в) радіолярія. 3. 8 хв 20 с. 4. б, в. 5.  $9,46 \cdot 10^{12}$  км.

№ 10. 3. 1—Г, 2—В, 3—Б. 4. 67 см. 9.  $c = 10$  см,  $b = 8,7$  см.

№ 11. 1. 3 м. 4.  $40^\circ$ . 5. 60 см; 80 см. 6. 8 км/год; на 4 м. 7.  $18^\circ$ .

№ 12. 2.  $1,24 \cdot 10^8$  м/с;  $2,26 \cdot 10^8$  м/с;  $3 \cdot 10^8$  м/с. 3.  $40^\circ$ . 5. 4 мкс. 7. 1) Середовища 2; 2) 1,5; 3)  $1,7 \cdot 10^8$  м/с; 4) 1,2; 2.

№ 13. 1. Чорними; зеленим. 2. Синього; усі, окрім синього. 3. Фіолетового. 4. Червоного.

№ 14. 1. Перша лінза розсіювальна, друга — збиральна. 2. Перша. 3. 62,5 см, розсіювальна. 6. Збиратиме. 7.  $S_1A_1 = 1,2$  см;  $OF = 3,75$  см.

№ 15. 2. 40 см. 3. -3 дптр, розсіювальна. 5. 1) 5 дптр; 2) 10 см. 7. 25 дптр.

№ 16. 1. 40 см, короткозорість. 2. 12,5 см. 5. -1 дптр.

**Завдання для самоперевірки до розділу II**

1. а. 2. б. 3. г. 4. б. 5. в. 6. в. 7. а. 8. в. 9. 4 м/с. 10.  $20^\circ$ . 11. 1,4. 12. 1 м. 13. 1—А, 2—В, 3—Г. 14. Збиральна, 50 см, +2 дптр. 15. Абсолютні показники склери людини та риби майже однакові, але в око риби світло потрапляє з води, тому заломлюється менше. 16. 5 см.

**Розділ III. «Механічні та електромагнітні хвилі»**

№ 17. 1. а) 2,5 см; б) 4 см. 2. 20 м/с. 3. Ні. 4. Не виникають сили пружності. 5. 45 км. 6. а) уліво; б) управо. 7. Для рис. а: 1) 40 см, 0,067 с, 1,6 м; 2) А і С — угору, В — не рухається; 3) 450. Для рис. б: 1) 20 см, 0,05 с, 2 м; 2) А — угору, В — униз, С — не рухається; 3) 600. 8. 3,2 м/с.

№ 18. 1. Так. 2. Частота помахів крил метелика менша від  $20 \text{ с}^{-1}$ . 3. 8,5 см; 37,5 см; 1,25 м. 5. 3 км. 6. 1700. 7. На 2,6 с. 10. 72 мкс.

№ 19. 1. 1) б; 2) а, б. 2. Провід:  $\lambda = 6000$  км,  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с; радіопередавач:  $v = 3 \cdot 10^9$  Гц;  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с; випромінювач:  $v = 2 \cdot 10^{14}$  Гц;  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с. 3. а) 750 нм, 400 нм; б) 457 нм, 240 нм. 5.  $0,5 \text{ с}^{-1}$ , 2 с.

№ 20. 1. 4, 2, 1, 3. 2. 1—Д, 2—В, 3—Г, 4—А. 3.  $5,3 \cdot 10^{14}$  Гц. 4. 100 мкм; інфрачервоне. 6. 0,4 с.

№ 21. 1. 3 км. 2. 0,5 м.

**Завдання для самоперевірки до розділу III**

1. б. 2. г. 3. а. 4. б. 5. г. 6. в. 7. а. 8. б. 9. 300 м. 10. 1—В, 2—Б, 3—Г. 11. Угору. 12. На 2 с. 13. Тон звуку стає більш високим. 14. 4 м; 17,6 м. 15. 2,4 с; 0,42 Гц; 48 м. 16. 4 м; 50 МГц.

**Розділ IV «Фізика атома та атомного ядра. Фізичні основи атомної енергетики»**

№ 22. 1.  $Z = 18$ ,  $N = 22$ . 2. Кількістю нейтронів. 3. 5; 11. 4. Sb. 5.  $2 \cdot 10^4$  Н.

№ 23. 1. а)  $\beta^-$  і  $\gamma$ -випромінювання; б)  $\gamma$ -випромінювання. 2.  $12 \cdot 10^{18}$  Гц. 4. На ядро  ${}_{89}^{228}\text{Ac}$ . 5.  $6,8 \cdot 10^{-27}$  кг;  $7,7 \cdot 10^{-13}$  Дж. 7.  $12,04 \cdot 10^{23}$ .

№ 24. 1. Уран-235; Радон-220. 2.  $\approx 7,2 \cdot 10^{17}$ . 3. У 8 разів. 4. 0,6 с. 5.  $3,7 \cdot 10^{20}$  Бк.

№ 25. 2.  $7,2 \cdot 10$  мкГр. 3. 16,6 Зв. 4. 90 мкЗв.

№ 26. 1. 234 МДж; 2,34 кг. 2. 82 ГДж. 3.  $\approx 17\%$ .

№ 27. 1. 32%. 2.  $69 \cdot 10^6$  кВт·год. 3. 432 ТДж. 4.  $\approx 16$  кг.

**Завдання для самоперевірки до розділу IV**

1. б. 2. б. 3. г. 4. а. 5. б. 6. б. 7. г. 8. б. 9. 1—Д, 2—Г, 3—В, 4—Б. 10. в. 11.  ${}_{84}^{214}\text{Po}$ . 12.  $2 \cdot 10^9$ . 13. 1644. 14. 10,4 мГр (безпечно). 15.  ${}_{88}^{225}\text{Ra}$ . 16. 8,4 кг.

## Розділ V «Рух і взаємодія. Закони збереження»

**№ 28.** 1. Так. 2.  $1,5 \text{ м/с}^2$ . 3.  $1 \text{ м/с}$ ;  $0$ ;  $-1 \text{ м/с}$ . 4. 0. 5. 20 с. 6. а)  $2 \text{ м/с}$ ,  $1 \text{ м/с}^2$ , ні; б)  $-20 \text{ м/с}$ ,  $5 \text{ м/с}^2$ , 4 с; в)  $10 \text{ м/с}$ ,  $-3 \text{ м/с}^2$ ,  $\approx 3,3 \text{ с}$ . 7. 1)  $v_x = -4 + 2t$ ; 2)  $v_x = 8 - 4t$ . 8. 1)  $v_x = 2 + 1,5t$ ; 2)  $v_x = -3 + t$ ; 3)  $v_x = 1$ ;  $v_x = 5 - 2t$ . 9. За 4 с до початку спостереження. 10. 30 м.

**№ 29.** 1. 35 м. 2. 100 м. 3.  $1,8 \text{ с}$ ;  $\approx 4,4 \text{ м/с}^2$ . 4. 1) б)  $x_{01} = 8 \text{ м}$ ,  $x_{02} = -2 \text{ м}$ ; в)  $v_{01x} = -2 \text{ м/с}$ ,  $v_{02x} = -5 \text{ м/с}$ ; 2)  $a_{1x} = 2 \text{ м/с}^2$ ,  $a_{2x} = 4 \text{ м/с}^2$ ; 2) 5 с, 23 м; 3)  $v_{1x} = -2 + 2t$ ,  $v_{2x} = -5 + 4t$ ;  $s_{1x} = -2t + t^2$ ,  $s_{2x} = -5t + 2t^2$ . 5.  $l = 40 \text{ м}$ ,  $s = 0$ ;  $x = -20 + 20t - 5t^2$ . 6. 40 с. 7. Так, якщо рухатись ескалатором униз зі швидкістю  $2,5 \text{ м/с}$ ; так.

**№ 30.** 1. На стілець —  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{N}$ ; на людину —  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ,  $\vec{N}$ ; дії скомпенсовані. 2. Води, весел, Землі. 3. Так; так; ні. 4. 2) 0;  $18 \text{ м/с}$ ; 3)  $2 \text{ м/с}^2$ ,  $2 \text{ м/с}^2$ . 6. а) 2 Н; б) 0.

**№ 31.** 1. 2,5 кН. 2. За напрямком руху; проти напрямку руху. 3.  $5 \text{ м/с}^2$ , на схід. 4. 2,5 т. 5.  $3 \text{ м/с}^2$ . 7. Обидва; дівчинка.

**№ 32.** 1. 10 Н. 2. Однаково. 3.  $0,5 \text{ м/с}^2$ . 4. Ні,  $F_{\text{нат}} = 200 \text{ Н}$ ; так,  $F_{\text{нат}} = 400 \text{ Н}$ .

**№ 33.** 1. 4,7 кг; 47 Н. 2. Ні. 3. Збільшиться в 2 рази. 4.  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ . 5.  $0,625 \text{ м/с}^2$ . 6.  $4,9 \text{ м/с}^2$ . 7.  $5 \text{ м/с}$ ,  $10 \text{ м/с}^2$ ;  $0,5 \text{ с}$ .

**№ 34.** 1. Прискорення однакові. 2. Усі тіла рухаються з однаковим прискоренням  $\vec{g}$ ; а) траєкторія руху — вітка параболи; б) тіло рухається вертикально вгору, потім змінює напрямку руху на протилежний; в) тіло рухається вертикально вниз. 3. а)  $10 \text{ м/с}$ ,  $15 \text{ м}$ ; б) 2 с, 20 м. 4. 3 с, 60 м, 75 м. 5.  $0,4 \text{ с}$ . 6.  $10 \text{ м/с}^2$ ; 7. 35 м. 8. Тіло 1 — 120 м; тіло 2 — 25 м. 9. 1 — А, 2 — Д, 3 — В, 4 — Б.

**№ 35.** 1. 3,5 кН. 2. 0,5. 3.  $48 \text{ Н/м}$ . 4. 110 Н, якщо прискорення напрямлене вгору, 70 Н — якщо вниз. 5. 15 Н;  $0,025$ . 6.  $0,9 \text{ м/с}^2$ . 7.  $\approx 0,06$ .

**№ 36.** 1. а)  $18 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ; б) 0; в)  $40,5 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . 2.  $25 \text{ м/с}$ . 4. а)  $4 \text{ м/с}$ ; б)  $1 \text{ м/с}$ ; в)  $1,75 \text{ м/с}$ . 5.  $1,4 \text{ м}$ .

**№ 37.** 1. Так. 2. 1 кН. 3.  $2,7 \text{ км/с}$ .

**№ 38.** 1. 1)  $168 \text{ кДж}$ ; 2)  $8 \text{ кДж}$ ; 3)  $160 \text{ кДж}$ . 2.  $12 \text{ м/с}$ . 3. 1)  $2 \text{ м/с}$ ; 2)  $0,5 \text{ м/с}$ ; 3)  $1,25 \text{ см}$ . 4.  $12,8 \text{ см}$ .

**№ 39.** 1. У лампі розжарення лише 5 % електричної енергії перетворюється на енергію світла, решта — на внутрішню енергію. 4. 15 %. 5. Поглинулася та сама кількість енергії.

## Завдання для самоперевірки до розділу V

1. б. 2. г. 3. в. 4. б. 5. а. 6. в. 7. а. 8.  $100 \text{ м/с}^2$ . 9. 30 м. 10.  $t_1 = 2 \text{ с}$ ,  $t_2 = 1 \text{ с}$ ;  $20 \text{ м/с}$ . 11. 240 Н, 160 Н. 12. 1 — Г, 2 — Д, 3 — А, 4 — Б. 13.  $\approx 0,25$ . 14. 1 с; 5 м. 15.  $h = R/4$ .

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

**А** Адаптація ока 100  
Акомодація 101  
Активність радіонукліда 158

**Б** Бекерель 158

**В** Взаємодія  
— гравітаційна 209, 245  
— електромагнітна 245  
— сильна 149, 245  
— слабка 245  
Випромінювання  
— альфа ( $\alpha$ ) 153  
— бета ( $\beta$ ) 153  
— гамма ( $\gamma$ ) 133, 153  
— інфрачервоне 132

— рентгенівське 133  
— ультрафіолетове 133  
Відлуння 121  
Вільне падіння 212  
Всесвіт 243

**Г** Гіпотеза Ампера 26  
Грей 163  
Гучність звуку 120  
Гучномовець електродинамічний 37

**Д** Джерело світла 56  
— точкове 58  
Дисперсія 86  
Діамагнетики 24  
Довжина хвилі 115

- Доза йонізуючого випромінювання  
— еквівалентна 164  
— поглинута 163  
Дозиметр 166  
Дослід(и)  
— Ампера 7  
— Ерстеда 7  
— Резерфорда 146  
— Фарадея 39
- Е** Електричний двигун 35  
Електромагніт 29  
Електромагнітна індукція 41  
Електромеханічний генератор 42  
Енергія 235  
— механічна 235  
Ехолокація 122
- З** Закон  
— відбивання світла 68  
— всесвітнього тяжіння 210  
— заломлення світла 76  
— збереження енергії 247  
— збереження імпульсу 228  
— збереження механічної енергії 236  
— інерції 199  
— Ньютона  
— — другий 203  
— — перший 201  
— — третій 206  
— прямолінійного поширення світла 62  
Зв'язок стільниковий 135  
Зиверт 164  
Зображення  
— в лінзі 94, 95  
— в плоскому дзеркалі 69
- І** Ізотопи 149  
Імпульс тіла 227  
Індукційний струм 41  
Інерціальна система відліку 200  
Інфразвук 121
- К** Колектор 35  
Кюрі 158
- Л** Лінза 89  
— збиральна 90, 94  
— розсіювальна 90, 95  
Лінії магнітної індукції 11
- М** Магніт постійний 6  
Магнітна індукція 10, 20  
Магнітний полюс 6
- Н** Нуклід 149
- О** Око 100  
Оптична густина середовища 76  
Оптична сила лінзи 91
- П** Парамагнетики 25  
Переміщення 187, 192  
Період піврозпаду 157  
Показник заломлення 77  
Поле  
— гравітаційне 209  
— електромагнітне 126  
— Землі 12  
— магнітне 8  
— однорідне 12  
Правило  
— лівої руки 20  
— свердлика 16  
Прискорення 187  
— вільного падіння 213
- Р** Радіоактивність 152, 154  
Радіолокація 136  
Радіохвилі 132  
Рух  
— механічний 186  
— реактивний 231  
— рівноприскорений прямолінійний 188
- С** Сила  
— Ампера 19  
— тяжіння 211
- Т** Температура Кюрі 6, 26  
Термоядерний синтез 171  
Тесла 10, 20  
Тінь 62
- У** Ультразвук 121
- Ф** Феромагнетики 25  
Фокусна відстань 91  
Формула тонкої лінзи 96  
Формула хвилі 115
- Х** Хвиля  
— електромагнітна 127  
— звукова 118  
— механічна 112  
— поздовжня 113  
— поперечна 113
- Ч** Число  
— нуклонне (масове) 148  
— протонне (зарядове) 148
- Ш** Швидкість миттєва 189  
Шкала електромагнітних хвиль 131
- Я** Явище інерції 199  
Ядерна реакція ланцюгова 169  
Ядерний реактор 170  
Ядерний цикл 174  
Ядерні сили 149

## ЗМІСТ

Передмова.....	3
----------------	---

### Розділ I. Магнітне поле

§ 1. Магнітні явища. Дослід Ерстеда. Магнітне поле.....	6
§ 2. Індукція магнітного поля. Лінії магнітної індукції. Магнітне поле Землі ....	10
§ 3. Магнітне поле струму. Правило свердлика .....	15
§ 4. Сила Ампера .....	19
§ 5. Магнітні властивості речовин. Гіпотеза Ампера .....	24
§ 6. Електромагніти та їх застосування.....	28
<i>Лабораторна робота № 1</i> .....	32
§ 7. Електродвигуни. Електровимірювальні прилади. Гучномовець .....	34
§ 8. Досліди Фарадея. Явище електромагнітної індукції. Індукційний електричний струм .....	39
<i>Лабораторна робота № 2</i> .....	45
Підбиваємо підсумки розділу I .....	48
Завдання для самоперевірки до розділу I .....	50
Енциклопедична сторінка.....	52
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень. Теми експериментальних досліджень .....	54

### Розділ II. Світлові явища

§ 9. Світлові явища. Джерела та приймачі світла. Швидкість поширення світла .....	56
§ 10. Світловий промінь і світловий пучок. Закон прямолінійного поширення світла. Сонячне та місячне затемнення .....	61
§ 11. Відбивання світла. Закони відбивання світла. Плоске дзеркало.....	67
<i>Лабораторна робота № 3</i> .....	73
§ 12. Заломлення світла на межі поділу двох середовищ. Закони заломлення світла .....	75
<i>Лабораторна робота № 4</i> .....	83
§ 13. Дисперсія світла. Спектральний склад природного світла. Кольори .....	85
§ 14. Лінзи. Оптична сила лінзи .....	89
§ 15. Побудова зображень у лінзах. Деякі оптичні пристрої. Формула тонкої лінзи.....	93
<i>Лабораторна робота № 5</i> .....	99
§ 16. Око як оптична система. Зір і бачення. Окуляри. Вади зору та їх корекція .....	100
Підбиваємо підсумки розділу II .....	104
Завдання для самоперевірки до розділу II .....	106
Енциклопедична сторінка.....	108
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень. Теми експериментальних досліджень .....	110

### Розділ III. Механічні та електромагнітні хвилі

§ 17. Виникнення та поширення механічних хвиль. Фізичні величини, які характеризують хвилі .....	112
§ 18. Звукові хвилі. Інфразвук. Ультразвук.....	118
<i>Лабораторна робота № 6</i> .....	124
§ 19. Електромагнітне поле й електромагнітні хвилі .....	126
§ 20. Шкала електромагнітних хвиль .....	130
§ 21. Фізичні основи сучасних бездротових засобів зв'язку. Радіолокація.....	135
Енциклопедична сторінка.....	139
Підбиваємо підсумки розділу III .....	140



Завдання для самоперевірки до розділу III . . . . .	142
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень . . . . .	144

## **Розділ IV. Фізика атома та атомного ядра.**

### **Фізичні основи атомної енергетики**

§ 22. Сучасна модель атома. Протонно-нейтронна модель ядра атома. Ядерні сили. Ізотопи . . . . .	146
§ 23. Радіоактивність. Радіоактивні випромінювання . . . . .	151
§ 24. Активність радіоактивної речовини. Застосування радіоактивних ізотопів . . . . .	157
§ 25. Йонізаційна дія радіоактивного випромінювання. Природний радіоактивний фон. Дозиметри . . . . .	163
§ 26. Ланцюгова ядерна реакція. Ядерний реактор. . . . .	168
§ 27. Атомна енергетика України. Екологічні проблеми атомної енергетики. . . . .	174
Підбиваємо підсумки розділу IV . . . . .	178
Завдання для самоперевірки до розділу IV . . . . .	180
Енциклопедична сторінка. . . . .	182
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень. . . . .	184

## **Розділ V. Рух і взаємодія. Закони збереження**

§ 28. Рівноприскорений прямолінійний рух. Прискорення. Швидкість рівноприскореного прямолінійного руху . . . . .	186
§ 29. Переміщення під час рівноприскореного прямолінійного руху. Рівняння координати. . . . .	192
§ 30. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона . . . . .	199
§ 31. Другий закон Ньютона . . . . .	203
§ 32. Третій закон Ньютона . . . . .	206
§ 33. Закон всесвітнього тяжіння. Сила тяжіння. Прискорення вільного падіння . . . . .	209
§ 34. Рух тіла під дією сили тяжіння . . . . .	215
§ 35. Рух тіла під дією кількох сил . . . . .	221
§ 36. Взаємодія тіл. Імпульс. Закон збереження імпульсу . . . . .	226
§ 37. Реактивний рух. Фізичні основи ракетної техніки. Досягнення космонавтики. . . . .	231
§ 38. Застосування законів збереження енергії та імпульсу в механічних явищах . . . . . <i>Лабораторна робота № 7.</i> . . . . .	235 241
§ 39. Фундаментальні взаємодії в природі. Межі застосування фізичних законів і теорій. Фундаментальний характер законів збереження . . . . .	243
§ 40. Еволюція фізичної картини світу. Фізика і науково-технічний прогрес . . . . .	250
Енциклопедична сторінка. . . . .	255
Підбиваємо підсумки розділу V . . . . .	256
Завдання для самоперевірки до розділу V . . . . .	258
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень . . . . .	260
Фізика та екологія. Альтернативні джерела енергії . . . . .	261
<i>Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць.</i> . . . . .	266
<i>Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки</i> . . . . .	266
<i>Алфавітний покажчик</i> . . . . .	268

*Рубрика «Фізика і техніка в Україні»:* Інститут магнетизму НАН і МОН України (9); О. І. Ахієзер (18); Київський національний університет ім. Тараса Шевченка (88); Інститут фізики НАНУ (92); О. Т. Смакула (103); Б. П. Грабовський (123); І. П. Пулюй (156); ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» (162); Інститут ядерних досліджень НАНУ (173); Одеський національний політехнічний університет (214); А. Ф. Йоффе (220); К. Д. Синельников (230); С. П. Корольов (234); В. М. Глушков (249); Б. І. Веркін (254).

## Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчальний рік	Стан підручника	
			на початку року	в кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

Навчальне видання  
*БАР'ЯХТАР Віктор Григорович*  
*ДОВГИЙ Станіслав Олексійович*  
*БОЖИНОВА Файна Яківна*  
*КІРЮХІНА Олена Олександрівна*

**«ФІЗИКА»**  
**підручник для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів**  
За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Провідний редактор *І. Л. Морева*. Редактор *О. В. Костіна*.  
Художнє оформлення *В. І. Труфен*.

Технічний редактор *А. В. Пліско*. Комп'ютерна верстка *С. В. Яшиш*.  
Коректор *Н. В. Красна*

В оформленні підручника використані зображення,  
розміщені в мережі Інтернет для вільного використання

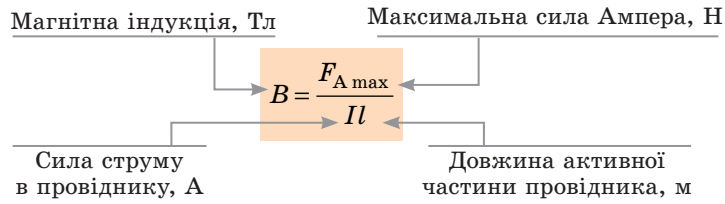
Підписано до друку 21.06.2017. Формат 70×100/16.  
Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 22,10. Обл.-вид. арк. 28,73. Тираж 368 141 прим. Зам. № 263-06

ТОВ Видавництво «Ранок»,  
вул. Кібальчича, 27, к. 135, Харків 61071.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5215 від 22.09.2016.  
Адреса редакції: вул. Космічна, 21а, Харків, 61145.  
E-mail: office@ranok.com.ua. Тел. (057) 701-11-22, тел./факс (057) 719-58-67.

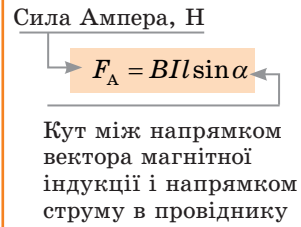
Надруковано у друкарні ТОВ «ТРИАДА-ПАК»,  
пров. Сімферопольський, 6, Харків, 61052.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5340 від 15.05.2017.  
Тел. +38 (057) 703-12-21. E-mail: sale@triada.kharkov.ua

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ

### Магнітна індукція

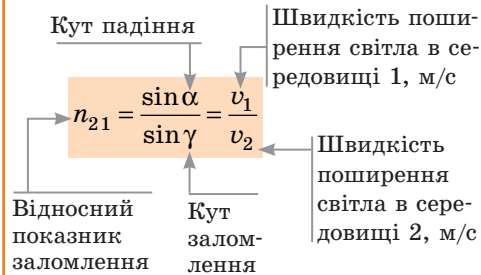


### Сила Ампера



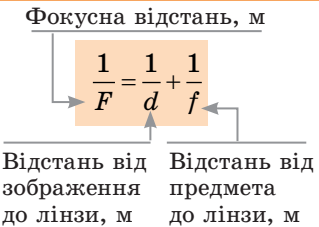
## ОПТИЧНІ ЯВИЩА

### Показник заломлення

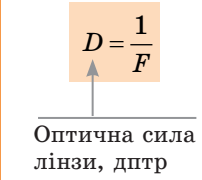


### Лінзи

#### Формула тонкої лінзи

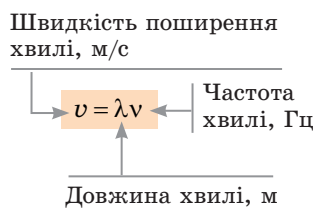


#### Оптична сила лінзи

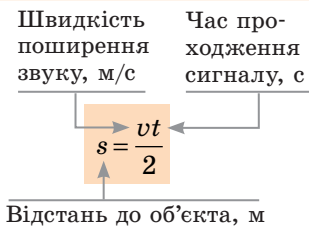


## МЕХАНІЧНІ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

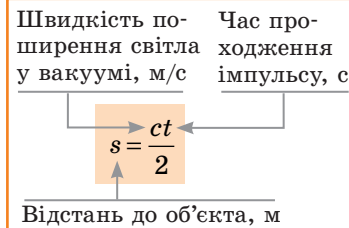
### Формула хвилі



### Ехолокація

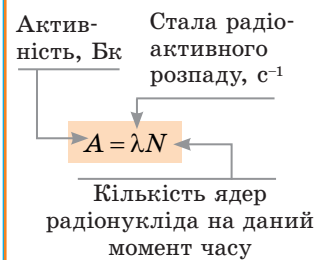


### Радіолокація



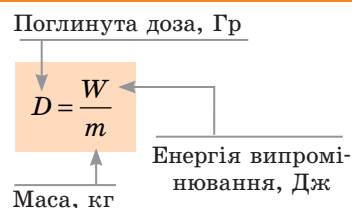
## РАДІОАКТИВНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

### Активність

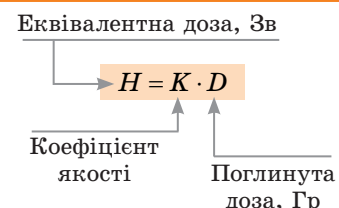


### Доза йонізуючого випромінювання

#### поглинута

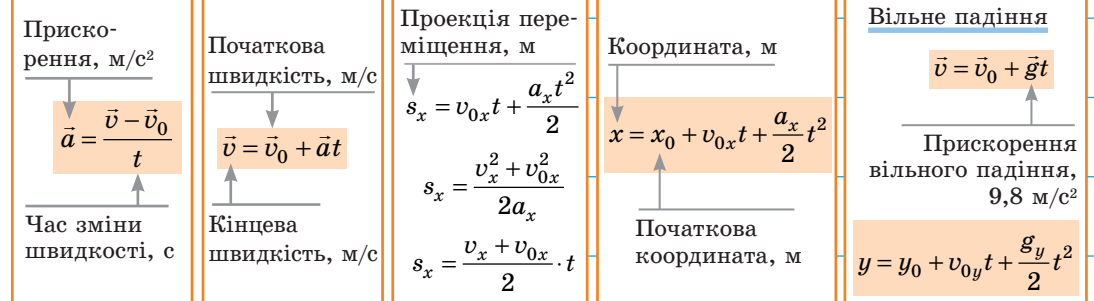


#### еквівалентна



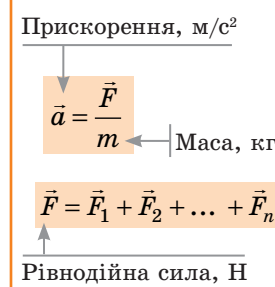
## КІНЕМАТИКА

### Рівноприскорений прямолінійний рух

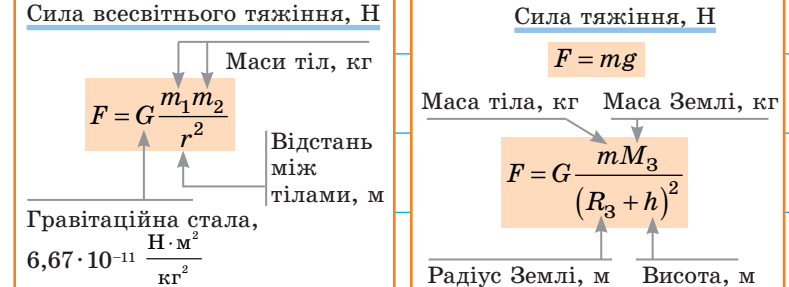


## ДИНАМІКА

### Другий закон Ньютона

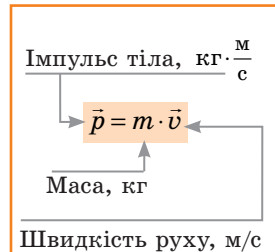


### Гравітаційні сили

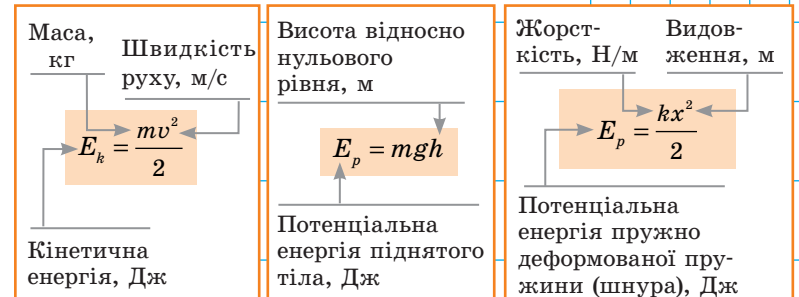


## ІМПУЛЬС ТІЛА, МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ

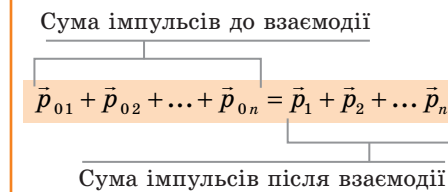
### Імпульс тіла



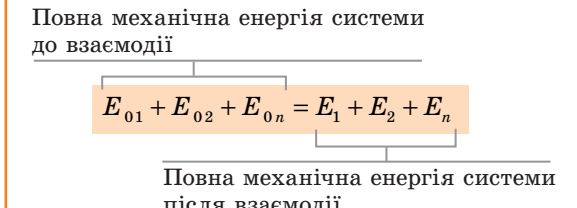
### Механічна енергія



### Закон збереження імпульсу



### Закон збереження механічної енергії



$$\lambda = \frac{0,69}{T_{1/2}}$$

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

$$F_{\text{пруж}} = k|x|$$

### Підручник відрізняє наявність таких матеріалів:

- Тексти та ілюстрації для мотивації навчальної діяльності
- Алгоритми розв'язання основних типів фізичних задач
- Завдання для самоперевірки
- Домашні експериментальні завдання
- Покрокові описи лабораторних робіт
- Тематичне узагальнення і систематизація матеріалу
- Приклади практичного застосування фізики
- Відомості про досягнення фізики та техніки в Україні

### Інтернет-підтримка підручника дозволить:

- здійснити інтерактивне онлайн-тестування за кожною темою
- унаочнити фізичний дослід або процес

Відеоролики демонстраційних і фронтальних експериментів створені на базі лабораторії МанЛаб Національного центру «Мала академія наук України»

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**



ISBN 978-617-09-3356-0



9 786170 933560



Інтернет-підтримка  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

