

# ФІЗИКА

10

КЛАС

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

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



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 31.05.2018 № 551)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

**Рецензенти:**

*I. М. Гельфгат*, учитель фізики комунального закладу  
«Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учитель-методист,  
Заслужений учитель України, кандидат фізико-математичних наук;  
*A. Б. Трофімчук*, завідувач кабінету фізико-математичних предметів  
Рівненського обласного інституту післядипломної освіти

Автори й видавництво висловлюють щиру подяку:  
*M. M. Кірюхіну*, президенту Спілки наукових і інженерних об'єднань України,  
кандидату фізико-математичних наук,  
за слушні зауваження й конструктивні поради;

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

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

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

**Ф50** **Фізика** (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / [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», 2018. — 272 с. : іл.

ISBN 978-617-09-4360-6

УДК [37.016:53](075.3)



Інтернет-підтримка

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

ISBN 978-617-09-4360-6

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я.,  
Кірюхіна О. О., 2018

© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2018

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2018

## Дорогі друзі!

Ви вивчаєте фізику вже четвертий рік. Сподіваємося, ви зуміли оцінити достоїнства цієї дивовижної науки про природу, і більше — ви намагаєтесь, використовуючи набуті знання, усвідомлювати й пояснювати явища та процеси, що відбуваються навколо. І знову з вами ваш помічник — підручник фізики. Нагадаємо його особливості.

Усі параграфи підручника завершуються рубриками: «Підбиваємо підсумки», «Контрольні запитання», «Вправа».

 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 всі запитання, то все гаразд; якщо ж ні, знову зверніться до тексту параграфа.

 Виявіти свою компетентність і застосувати набуті знання на практиці допоможе матеріал рубрики «Вправа». Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які слід виявіти 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.

 Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання*. Обов'язково виконуйте експериментальні завдання та *лабораторні роботи* — і ви будете краще розуміти фізику.

 Чимало цікавого та корисного ви дізнаєтесь завдяки *інтернет-підтримці*. 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; приклади розв'язування задач.

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

Рубрика «*Фізика в цифрах*» слугує містком, що пов'язує новітні досягнення техніки з навчальним матеріалом параграфів.

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*».

Для тих, хто вже замислюється над вибором майбутньої професії та прагне знати більше про перспективи розвитку ринку праці, призначена рубрика «*Професії майбутнього*».

*Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!*

# ОРИЄНТОВНІ ТЕМИ ПРОЕКТІВ, РЕФЕРАТІВ І ПОВІДОМЛЕНЬ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## РОЗДІЛ I

### Теми проектів

1. Вивчення фізичних характеристик власного тіла.
2. Резонанс: прояви і застосування.
3. Паски безпеки в транспорті.

### Теми рефератів і повідомлень

1. Час і його вимірювання.
2. Внесок космонавтів і астронавтів в освоєння космічного простору.
3. Внесок Амалі Еммі Нетер у розвиток теоретичної фізики.
4. Особливості конструкції високошвидкісного транспорту.
5. Рух у біологічних системах.
6. Сила тертя в техніці і природі.
7. Як «працює» парашут.
8. Навіщо спортсмени «закручують» м'яч.
9. Закони фізики і танцювальні рухи.
10. Важелі в живій природі.
11. Гідродинамічні характеристики кровоносної системи.
12. Вплив звуку та інфразвуку на організми, шумове забруднення.
13. Ультразвук у медицині.

### Теми експериментальних досліджень

1. Залежність дальності польоту тіла від напрямку та значення початкової швидкості його руху.
2. Створення штучної гравітації.
3. Залежність гальмівного шляху та часу гальмування від маси і швидкості тіла.
4. «Завдання» боксерських рукавичок і бинтів.
5. Аеродинамічні властивості паперових літаків.
6. Додавання гармонічних коливань, отримання фігур Ліссажу.
7. Аналіз рівня шуму в шкільних приміщеннях. Рекомендації проектувальникам.

## РОЗДІЛ II

### Теми рефератів і повідомлень

1. Подорож у часі за теорією А. Ейнштейна.
2. Навіщо потрібні прискорювачі елементарних частинок.
3. Повчальні історії з життя першого космонавта незалежної України Л. К. Каденюка.
4. Придатні для життя планети. Як до них дістatisя?
5. Темна енергія і темна матерія.
6. Всесвіт як результат Великого вибуху.

## РОЗДІЛ III

### Теми проектів

1. Дифузія та її значення.
2. Глобальне потепління: чи є загроза?
3. Вологість і температура повітря у приміщеннях, способи збереження тепла.

### Теми рефератів і повідомлень

1. Адіабатний процес у природі, техніці.
2. Аномальні властивості води.
3. «Жива» і «мертва» вода.
4. Капілярні явища в ґрунті.
5. Чому з'являються тріщини на стінах будинків. Як запобігти їх появи.
6. Фізика і хімія у процесах випікання та зберігання хліба.
7. Захист двигунів від перегріву.
8. Теплові процеси в тілі людини.
9. Порівняння економічної доцільності використання автомобілів із ДВЗ і електромобілів.
10. Ваші поради прем'єр-міністру: чи доцільно розвивати альтернативну енергетику в Україні.
11. Еволюція автомобільних двигунів.

### Теми експериментальних досліджень

1. Залежність температури кипіння від зовнішнього тиску, наявності домішок тощо.
2. Вирощування кристалів і вивчення їх фізичних властивостей.
3. Дослідження капілярних явищ.
4. Залежність швидкості випаровування води від різних факторів.

## РОЗДІЛ IV

### Теми проектів

1. Електростатичні явища та життєдіяльність організмів.
2. Електростатичні явища навколо.
3. Трибоелектрика та її застосування.

### Теми рефератів і повідомлень

1. Електростатичні методи лікування.
2. Електричне поле в клітинах істот.
3. Увага: висока напруга.
4. Історія створення блискавковідводу.
5. Заземлення побутових електроприладів.
6. Земля — величезний конденсатор.

### Теми експериментальних досліджень

1. Дослідження взаємодії заряджених тіл.
2. Виготовлення електроскопа. Дослідження за його допомогою заряджених тіл.
3. Різні способи візуалізації силових ліній електричного поля.

## § 1. ЗАРОДЖЕННЯ І РОЗВИТОК ФІЗИКИ ЯК НАУКИ



Ще зовсім недавно люди навіть не могли мріяти про можливості, які мають зараз. Досягнення в таких галузях, як робототехніка, штучний інтелект, нанотехнології, 3D-друк, генетика, біотехнологія, сьогодні швидко взаємодоповнюються. Розумні системи, що вже створені або тільки створюються: будинки, фабрики, ферми й навіть міста — допоможуть вирішувати різні проблеми людства. Зрозуміло, що все зазначене не може не впливати на формування світогляду сучасної людини. Разом із тим слід завжди пам'ятати, що нові відкриття — це не тільки прогрес, але й величезна відповідальність.

У сучасному світі — бурхливому, суперечливому й разом з тим взаємозалежному — важливим є усвідомлення того, що світ пізнаваний, що випадковість не тільки плутає і порушує наші плани, але й створює нові можливості; що існують незмінні орієнтири-інваріанти; що в міру розвитку знань відбувається руйнування старих «рамок» наших уявлень. Передбачаємо ваше запитання: а до чого тут природничі науки? Сподіваємося, наприкінці 11 класу ви самі зможете на нього відповісти. А зараз лише зазначимо, що всі ці висновки випливають із істин, відкритих природничими науками, оскільки їх закономірності та принципи мають глобальний характер і тому виходять за межі власне наук.

### 1 Які етапи пройшла фізика під час свого розвитку

Історія фізики — це довжелезна історія відкриттів. І з кожним із них глибшає наше розуміння природи. За будь-яким відкриттям стоїть конкретна людина, а частіше група людей, чиїми зусиллями фізика як наука підіймалася на новий щабель розвитку. Ви вже знаєте багато імен людей, чия діяльність сприяла прогресу фізичної науки. Спробуємо систематизувати знання про дослідників природи й першовідкривачів невідомого та простежимо, як накопичувалися фізичні знання.

## ОСНОВНІ ЕТАПИ

Із кінця XIX / початку XX ст. Зв'язок властивостей простору-часу з енергією та імпульсом матеріальних тіл був у能找到ний А. Ейнштейном у загальній теорії відносності. Учений узагальнив результати І. Ньютона щодо гравітаційної взаємодії, ув'язавши її з кривизною простору-часу.

Фундамент квантової механіки на початку XX ст. заклали М. Планк, А. Ейнштейн, Н. Бор, М. Борн.

Із відкриттям А. Беккерелем радіоактивності почався розвиток ядерної фізики, який сприяв появі нових джерел енергії — атомної енергії та енергії ядерного синтезу. Відкриття, зроблені в ході досліджень ядерних реакцій, започаткували фізику елементарних частинок.

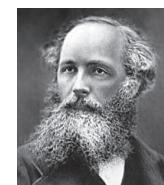
Сучасні уявлення про Великий вибух, чорні діри, розширення Всесвіту з прискоренням, про темну енергію пов'язані з працями Е. Габбла, Р. Оппенгеймера, Х. Снайдера, Дж. Вілера, С. Гокінга та ін.

Установлення структури атома як системи, що складається з малого за розмірами ядра, яке має позитивний заряд, та електронів, заряджених негативно. Е. Резерфорд вважається «батьком» ядерної фізики.



Ернест  
Резерфорд

1871–1937



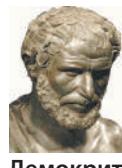
Джеймс  
Максвелл

Створення теорії електромагнітного поля, яка пояснювала всі відомі на той час факти й дозволяла передбачати нові явища.

Сучасна  
фізика

1831–1879

Ідея атомарної будови матерії. Експериментально цю ідею було підтверджено тільки на початку ХХ ст.



Демокрит



Аристотель

Узагальнення та систематизація знань у царині природничих наук. Праці Аристотеля до XVI ст. вважалися «безумовною істиною». Уявлення філософа про звукові хвилі збереглись і в сучасній фізиці.

Становлення  
фізики

бл. 460 —  
бл. 370 рр. до н. е.

384–322 рр. до н. е.

бл. 310 —  
бл. 230 рр. до н. е.

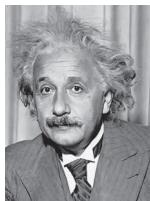
Із давніх часів до кінця XVI ст. Передісторія фізики — це період накопичення фізичних знань, закладання наукових уявлень про властивості навколошнього світу. Величезний вплив на формування фізичних понять і закономірностей здійснили мислителі Стародавньої Греції: Аристотель, Архімед, Аристарх Самоський, Демокрит, Левкіпп, Піфагор, Птолемей, Евклід.

Ідея геліоцентричної (від грец. *Helios* — Сонце) будови світу. Теоретичне пояснення цієї ідеї з'явилося майже через 2000 років потому.



Аристарх  
Самоський

## РОЗВИТКУ ФІЗИКИ



Альберт Ейнштейн

Один із засновників сучасної теоретичної фізики; за словами самого вченого, справжня мета його досліджень «завжди полягала в тому, щоб домогтися спрощення теоретичної фізики та її об'єднання в цілісну систему».



Нільс Бор

Створення квантової теорії планетарного атома, розроблення фізичних ідей квантової механіки.

1879–1955

1885–1962

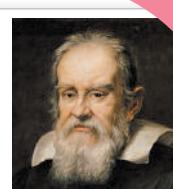
*Кінець XVII ст. — кінець XIX / початок ХХ ст.* Період починається побудовою першої фізичної (механічної) картини світу (І. Ньютона) і продовжується бурхливим розвитком галузі фізики, пов’язаної з використанням теплових двигунів (Дж. Ватт, С. Карно). Вивчення електричних і магнітних явищ (Ш. Кулон, А. Ампер, Г. Ерстед, М. Фарадей) завершується створенням Дж. Максвеллом рівнянь електромагнітного поля, які стали теоретичною основою для сучасної електротехніки та радіозв’язку.



Ісаак Ньютон

Розуміння будови Сонячної системи, формулювання загальних уявлень про будову Всесвіту й основних законів механіки, які визначили розвиток фізики на 300 років наперед.

### Класична фізика



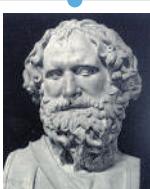
Галілео Галілей

Відкриття принципу відносності в механіці, обґрутування геліоцентричної будови світу, створення телескопа, відкриття в астрономії, винайдення термометра та ін.

1642–1727

1564–1642

### Формування фізики як науки



Архімед

Запровадження поняття центра тяжіння, побудова теорії рівноваги важеля, визначення моменту сил, відкриття законів плавання тіл. Здобутки вченого в інженерії — основа для багатьох сучасних механізмів.

*Початок XVII ст. — 80-ти pp. XVII ст.* Розвиток фізики як науки пов’язують з ім’ям Г. Галілея, експерименти якого заклали фундамент класичної механіки. Розвиток ремесел і судноплавства стимулював дослідження, що спираються на експеримент. У цей період створюють барометр (Е. Торрічеллі), формулюють газовий закон (Р. Бойль, Е. Маріотт), відкривають закон заломлення світла (В. Снелліус, Р. Декарт), розмежовують електричні та магнітні явища (В. Гільберт).

287–212 pp. до н. е.

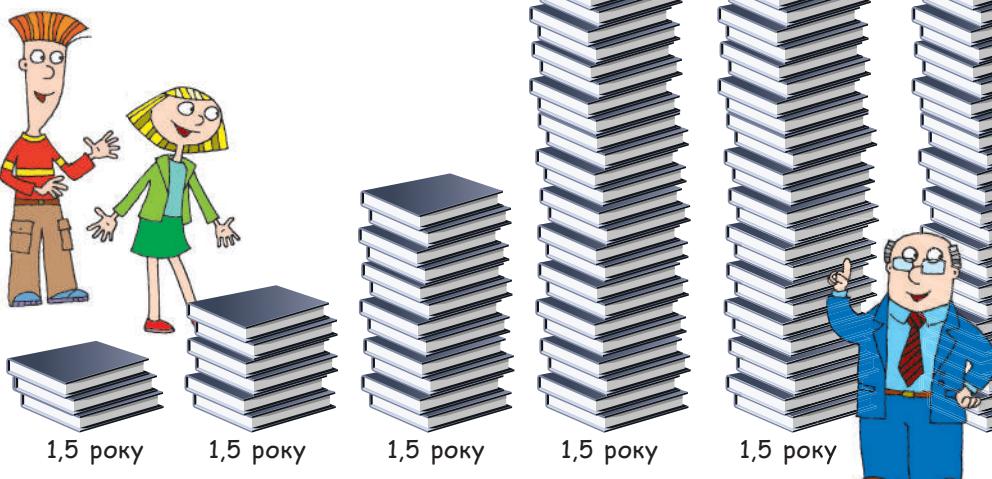
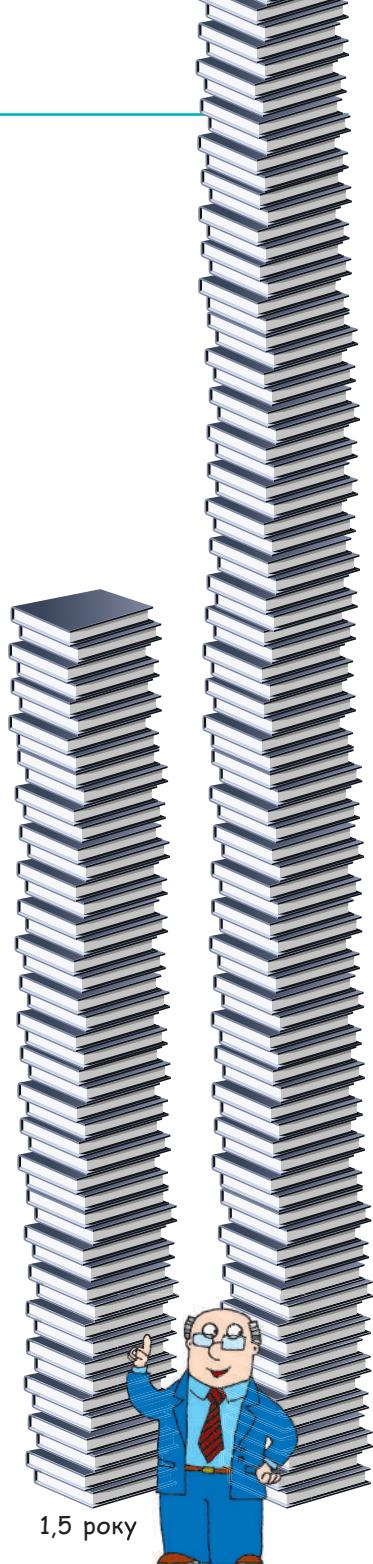
## 2

**Які питання турбують сучасних фізиків**

Практично кожного дня з'являється нова інформація та нові знання про навколошній світ, причому їх обсяг настільки значний, що іноді вони застарівають раніше, ніж ми встигаємо про них дізнатися (рис. 1.1).

Незважаючи на великий обсяг накопичених знань, сучасна фізика ще дуже далека від пояснення всіх явищ природи. Дотепер фізики не можуть пояснити природу темної матерії, походження високоенергетичних космічних частинок та багато іншого. На думку британського фізика Стівена Гокінга (1942–2018), «прогрес полягає не в заміні неправильної теорії на правильну, а в заміні неправильної теорії на неправильну, але вже уточнену».

Багато десятиліть учени намагаються створити теорію, яка пояснювала б Всесвіт, об'єднавши теорії фундаментальних взаємодій: сильної, слабкої, електромагнітної, гравітаційної. Певних успіхів у цьому напрямі вже досягнуто: у фізиці елементарних частинок створено *Стандартну модель* — теорію, що об'єднує сильну, слабку й електромагнітну взаємодії елементарних частинок.



**Рис. 1.1.** За даними досліджень, обсяг інформації безперервно зростає. У наш час він подвоюється кожні півтора року. Сучасна людина за місяць отримує стільки інформації, скільки людина XVII ст. отримувала протягом життя. Щоб рухатися в ногу із часом, слід невпинно займатися самоосвітою

На сьогодні Стандартна модель узгоджується з експериментами, і недавне відкриття бозона Хіг'са є яскравим підтвердженням цього. Проте фізики намагаються вийти за межі цієї моделі та дізнатися про речі, які поки що пояснити не можуть, наприклад чому у світі практично немає античастинок й антиматерії. Тому нині в Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) у Женеві активно проводять експерименти з дослідження процесів, що відбувалися під час зародження Всесвіту. Тож чекаємо на нові відкриття!



### Контрольні запитання

1. Які етапи розвитку пройшла фізика як наука? Які ідеї розвивалися на кожному з етапів?
2. На яких проблемах зосереджена сучасна фізика?
3. Назвіть імена відомих вам учених-фізиків. У якій галузі фізики вони працювали?
4. Відкриття в яких галузях фізики дозволили створити побутові пристрої? Наведіть приклади.



### Вправа № 1

1. У тексті § 1 названо ім'я лише одного філософа Стародавньої Греції, що висунув гіпотезу про атомарну будову речовини. Які ще філософи того часу висловлювали таку ідею?
2. Чим уславився Архімед як інженер? Які його винаходи зараз можна побачити навіть на дитячих майданчиках?
3. Уявіть, що ви SMM-менеджер освітнього закладу, і напишіть переконливий пост на тему «Чому дизайнерові (чи будь-якому іншому сучасному фахівцю) необхідно вивчати фізику».
4. Унаслідок неправильного використання технологій загинули і ще можуть загинути тисячі людей, змінилися і можуть змінитися на гірше долі мільйонів. Наведіть приклади на підтвердження або спростування цієї тези. Проведіть із друзями дискусію на тему «Чи може науково-технічний прогрес довести людство до глобальної катастрофи». Сформулюйте та запишіть основні результати обговорення.
5. Чи стикалися ви з неправдивою інформацією в Інтернеті? Якщо так, то що саме допомогло вам з'ясувати її неправдивість? Сформулюйте свої поради з цього приводу.

### Фізика і техніка в Україні



**Інститут теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАНУ** (Київ) — провідний науковий центр із фундаментальних проблем теоретичної, математичної та обчислювальної фізики, створений у 1966 р. Засновником інституту та його першим директором був усесвітньо відомий фізик-теоретик і математик, академік Микола Миколайович Боголюбов.

Тематика наукових досліджень інституту охоплює широке коло проблем астрофізики й космології, фізики високих енергій, теорії ядерних систем, квантової теорії молекул і кристалів.

В інституті працює Науково-освітній центр для обдарованих школярів і студентів.

## § 2. МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНІ ТА ЇХ ВИМІРЮВАННЯ. НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ



Чим відрізняється мова фізики (та й будь-якої іншої точної науки) від звичайної мови? Мова фізики інтернаціональна: вона створювалася найкращими умами всіх народів, її однозначно розуміють у будь-якому куточку нашої планети. Мова фізики об'єктивна: кожне її поняття має один зміст, який може змінитися (найчастіше — розширитися) тільки завдяки дослідам.

Як і методи наукового пізнання, мова фізики народилася з практики. Про методи фізичних досліджень і деякі поняття мови фізики ви згадаєте в цьому параграфі.

## 1

### Що таке фізичне дослідження і якими є його методи

Згадаємо, із чого починається дослідницька робота вчених. Перш за все — це *спостереження* за певним явищем (тілом або матеріалом) і міркування над його сутністю.

**Спостереження** — це сприйняття природи з метою одержання первинних даних для подальшого аналізу.

Далеко не завжди спостереження ведуть до правильного висновку. Тому, щоб спростувати або довести власні висновки, учений проводить *фізичні дослідження*.

**Фізичне дослідження** — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики.

Методи фізичних досліджень	
експериментальний	теоретичний
<p><b>Експеримент</b> — дослідження фізичного явища в умовах, які перебувають під контролем ученого.</p> <p>У своїй основі фізика є експериментальною наукою: більшість її законів ґрунтуються на фактах, виявлених дослідним шляхом.</p>	<p>Аналіз отриманих у результаті експериментів даних, формулювання законів природи, пояснення певних явищ і властивостей на основі цих законів, а головне — передбачення й теоретичне обґрунтування (із широким використанням математики) нових явищ і властивостей.</p>



Які спостереження, теоретичні й експериментальні дослідження ви провели б, щоб дослідити світіння звичайної лампи розжарення?

Теоретичні дослідження проводять не з конкретним фізичним тілом, а з його ідеалізованим аналогом — **фізичною моделлю**, яка має враховувати невелику кількість основних властивостей досліджуваного тіла. Так, вивчаючи рух автомобіля, ми інколи використовуємо його фізичну модель — *матеріальну точку* (рис. 2.1, а). Цю модель застосовують, якщо розміри тіла не є суттєвими для теоретичного опису руху автомобіля, тобто в моделі «матеріальна

точка» враховують тільки масу тіла, а його форму та розміри до уваги не беруть. А от якщо необхідно визначити, як на рух автомобіля впливає опір повітря, доцільно застосовувати вже іншу фізичну модель — вона має враховувати і форму, і розміри автомобіля (рис. 2.1, б), але не буде враховувати, наприклад, розташування пасажирів у салоні. Чим більше обрано відповідних параметрів для дослідження фізичної системи «автомобіль», тим краще можна передбачити «поведінку» цієї системи.



Чи доцільно використовувати модель «матеріальна точка», якщо інженери мають розрахувати стійкість автомобіля?

## 2

### Як виміряти фізичну величину

Описуючи, наприклад, рух автомобіля, ми обов'язково використовуємо певні *кількісні характеристики*: швидкість, прискорення, час руху, силу тяги, потужність тощо. Із попереднього курсу фізики ви знаєте, що *кількісну міру певної властивості тіла, певного фізичного процесу або явища називають фізичною величиною*.

Значення фізичної величини встановлюють у ході вимірювання.

Вимірювання бувають **прямі** і **непрямі**.

У разі *прямих вимірювань* величину порівнюють із її одиницею (метром, секундою, кілограмом, ампером тощо) за допомогою вимірювального приладу, проградуйованого у відповідних одиницях (рис. 2.2).



Назвіть кілька фізичних величин, значення яких ви знаходили за допомогою прямих вимірювань. У яких одиницях вимірюють ці величини? якими приладами?

У разі *непрямих вимірювань* величину обчислюють за результатами прямих вимірювань інших величин, пов'язаних із вимірюваною величиною певною функціональною залежністю. Так, щоб обчислити середню густину  $\rho$  тіла, потрібно за допомогою терезів виміряти його масу  $m$ , за допомогою, наприклад, мензурки виміряти об'єм  $V$ , а потім масу поділити на об'єм:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$



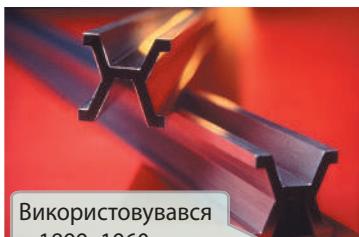
**Рис. 2.1.** Визначаючи швидкість і час руху автомобіля, можна застосовувати фізичну модель «матеріальна точка» (а); визначаючи аеродинамічні властивості автомобіля, цю фізичну модель застосовувати не можна (б)



**Рис. 2.2.** Сучасні прилади для прямого вимірювання температури (а); маси (б); швидкості руху (в)

**Основні одиниці СІ**

- **кілограм (1 кг, 1 kg)** одиниця *маси*
- **метр (1 м, 1 m)** одиниця *довжини*
- **секунда (1 с, 1 s)** одиниця *часу*
- **ампер (1 А, 1 A)** одиниця *сили струму*
- **моль (1 моль, 1 mol)** одиниця *кількості речовини*
- **кельвін (1 К, 1 K)** одиниця *температури*
- **кандела (1 кд, 1 kd)** одиниця *сили світла*



Використовувався в 1899–1960 рр.

**1 метр** Довжина

1/10 000 000 частини чверті меридіана Землі, який проходить через Париж (Франція)

**3****Побудова системи одиниць**

Завдання вибудувати систему одиниць на науковій основі було поставлено перед французькими вченими наприкінці XVIII ст., після Великої французької революції. У результаті з'явилася *метрична система одиниць*. У 1960 р. було створено *Міжнародну систему одиниць СІ*, яка згодом стала у світі домінуючою.

Історично одиниці фізичних величин пов'язували з певними природними тілами або процесами. Так, 1 метр був пов'язаний із розмірами планети Земля, 1 кілограм — із певним об'ємом води, 1 секунда — з добовим обертанням Землі. Потім для кожної одиниці створювали **еталон** — засіб (або комплекс засобів) для відтворення та зберігання одиниці фізичної величини. Основні еталони зберігалися (і зберігаються зараз) у Міжнародному бюро мір і ваг (м. Севр, Франція).

Зараз дедалі більше поширюються методи побудови системи одиниць, які ґрунтуються на особливостях випромінювання та поширення електромагнітних хвиль і на фундаментальних фізичних константах.

Розглянемо основні етапи побудови системи одиниць на прикладах метра і кілограма.

Спеціальний відрізок, калібраний за довжиною. Довжину цього відрізка визначено як 1 метр

1 метр дорівнює шляху, який проходить світло у вакуумі за інтервал часу 1/299 792 458 секунди

**1 кілограм** Маса 1 літра чистої води за температури 4 °C й атмосферного тиску 760 мм рт. ст.

Платиново-іридієвий циліндр, діаметр і висота якого 39 мм. Масу цього зразка визначено як 1 кілограм

Поки залишається платино-во-іридієвий циліндр, але планується пов'язати 1 кілограм зі сталовою Планка або з числом Авогадро

Створений у 1899 р.



Нагадаємо, що для зручності запису великих і малих значень фізичних величин використовують *кратні та частинні одиниці*.

**Кратні одиниці** є більшими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів.

**Частинні одиниці** є меншими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів.

Назви кратних і частинних одиниць містять певні префікси. Наприклад, **кілометр** (1000 м, або  $10^3$  м) — кратна одиниця довжини, **міліметр** (0,001 м, або  $10^{-3}$  м) — частинна одиниця довжини (див. табл. 1).

#### 4 Похибки вимірювань

У ході вимірювання будь-яких фізичних величин зазвичай виконують три послідовні операції: 1) вибір, перевірка та встановлення приладу (приладів); 2) зняття показів приладів; 3) обчислення шуканої величини за результатами вимірювань (у разі непрямих вимірювань); 4) оцінювання похибки.

Наприклад, слід виміряти відстань близько 5 м. Зрозуміло, що для цього не треба брати учнівську лінійку, — зручніше скористатися рулеткою. Усі прилади мають певну точність. Відстань у 5 м, як правило, не потрібно визначати з точністю до міліметра, тому шкала рулетки може й не містити відповідних поділок.

А от якщо для полагодження лабораторного крана необхідно визначити розмір дрібної шайби, доцільно скористатися штангенциркулем (див. рис. 2.3).

Але навіть за допомогою надточного приладу не можна здійснити вимірювання абсолютно точно. Завжди є **похибки (невизначеності) вимірювань** — відхилення значення вимірюваної величини від її істинного значення.

Модуль різниці між вимірюним ( $x_{\text{вим}}$ ) та істинним ( $x$ ) значеннями вимірюваної величини називають **абсолютною похибкою вимірювання**  $\Delta x$ :

$$\Delta x = |x_{\text{вим}} - x|$$

Відношення абсолютної похибки до вимірюваного значення вимірюваної величини називають **відносною похибкою вимірювання**  $\varepsilon_x$ :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}}, \text{ або у відсотках: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$$

Таблиця 1  
Префікси для утворення  
назв кратних  
і частинних одиниць

Префікс	Позначення	Множник
ато-	а	$10^{-18}$
фемто-	ф	$10^{-15}$
піко-	п	$10^{-12}$
нано-	н	$10^{-9}$
мікро-	мк	$10^{-6}$
мілі-	м	$10^{-3}$
санти-	с	$10^{-2}$
кіло-	к	$10^3$
мега-	М	$10^6$
гіга-	Г	$10^9$
тера-	Т	$10^{12}$
пета-	п	$10^{15}$
екса-	е	$10^{18}$



Рис. 2.3. Штангенциркуль. Точність вимірювання зображенням приладом — соті частки міліметра

Похибки в ході вимірювань бувають **випадкові** і **систематичні**.

Випадкові похибки	Систематичні похибки
<p><b>Випадкові похибки пов'язані з процесом вимірювання:</b> вимірюючи рулеткою відстань, неможливо прокласти рулетку ідеально рівно; відлічуючи час секундоміром, неможливо його миттєво ввімкнути та вимкнути, й т. д.</p> <p>Щоб результати були точнішими, вимірювання проводять кілька разів і визначають <b>середнє значення вимірюваної величини</b>:</p> $x_{\text{вим}} = x_{\text{сер}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$ <p>де <math>x_1, x_2, \dots, x_N</math> — результати кожного з <math>N</math> вимірювань.</p> <p>У даному разі <b>випадкову абсолютну похибку</b> <math>\Delta x_{\text{вип}}</math> можна визначити за формулою:</p> $\Delta x_{\text{вип}} = \frac{ x_1 - x_{\text{вим}}  +  x_2 - x_{\text{вим}}  + \dots +  x_N - x_{\text{вим}} }{N}$ <p>Якщо вимірювання проводилося один раз, то вважатимемо, що <b>випадкова похибка дорівнює половині ціни поділки шкали приладу</b>.</p>	<p><b>Систематичні похибки пов'язані насамперед із вибором приладу:</b> неможливо знайти рулетку з ідеально точною шкалою, ідеально рівноплечі важелі тощо. Систематичні похибки визначаються класом точності приладу, тому їх часто називають <b>похибками приладу</b>.</p> <p>У процесі експлуатації точність приладів може зменшуватися, тому їх необхідно періодично калібрувати за допомогою спеціального обладнання.</p> <p>Абсолютні похибки деяких приладів, що використовують у школі, наведено в табл. 2. Якщо використовуються інші прилади, вважатимемо, що похибка приладу дорівнює половині ціни поділки шкали цього приладу.</p>

**Абсолютна похибка прямого вимірювання** ( $\Delta x$ ) враховує як систематичну похибку, зумовлену приладом ( $\Delta x_{\text{прил}}$ ), так і випадкову похибку ( $\Delta x_{\text{вип}}$ ), зумовлену процесом вимірювання:  $\Delta x = \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{вип}}$ .

**Зверніть увагу!** Наведені формули є дуже спрощеними. Учені використовують значно складніші формули та методи розрахунків похибок.

Таблиця 2. Абсолютні похибки деяких фізичних приладів

Фізичний прилад	Ціна поділки шкали приладу	Абсолютна похибка приладу
Лінійка учнівська	1 мм	$\pm 1$ мм
Стрічка вимірювальна	0,5 см	$\pm 0,5$ см
Штангенциркуль	0,1 мм	$\pm 0,05$ мм
Циліндр вимірювальний	1 мл	$\pm 1$ мл
Секундомір	0,2 с	$\pm 1$ с за 30 хв
Динамометр навчальний	0,1 Н	$\pm 0,05$ Н
Термометр лабораторний	1 °C	$\pm 1$ °C

## 5

### Як визначити похибки непрямих вимірювань

Багато фізичних величин неможливо виміряти безпосередньо. Їх **непряме** вимірювання має два етапи: 1) методом прямих вимірювань знаходить значення певних величин, наприклад  $x, y$ ; 2) за відповідною формулою

обчислюють шукану величину  $f$ . Як у такому випадку визначити абсолютну  $\Delta f$  і відносну  $\varepsilon_f$  похибки?

- Відносну похибку визначають за певними формулами (див. табл. 3).
- Абсолютну похибку визначають за відносною похибкою:

$$\Delta f = \varepsilon_f \cdot f_{\text{вим}}$$

• Якщо експеримент проводять, щоб з'ясувати, чи справжується певна рівність (наприклад,  $X = Y$ ), то відносну похибку експериментальної перевірки рівності  $X = Y$  можна оцінити за формулою:

$$\varepsilon = \left| \frac{X}{Y} - 1 \right| \cdot 100 \%$$

Таблиця 3. Деякі формули для визначення відносної похибки

Функціональна залежність	Відносна похибка
$f = x + y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = xy$	
$f = \frac{x}{y}$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = x^n$	$\varepsilon_j = n\varepsilon_x$

## 6

### Як правильно записати результати

Абсолютна похибка експерименту визначає точність, із якою є сенс обчислювати вимірювану величину.

Абсолютну похибку  $\Delta x$  зазвичай округлюють до однієї значущої цифри із звіщенням, а результат вимірювання  $x_{\text{вим}}$  — до величини розряду, який залишився в абсолютній похибці після округлення. Остаточний результат  $x$  записують у вигляді:

$$x = x_{\text{вим}} \pm \Delta x$$

Абсолютна похибка — додатна величина, тому  $x = x_{\text{вим}} + \Delta x$  — найбільше їмовірне значення, а  $x = x_{\text{вим}} - \Delta x$  — найменше їмовірне значення вимірюваної величини (рис. 2.4).

*Приклад.* Нехай вимірювали прискорення вільного падіння ( $g$ ). Після обробки експериментальних даних отримали:  $g_{\text{вим}} = 9,736 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta g = 0,123 \text{ м/с}^2$ .

Абсолютну похибку слід округлити до однієї значущої цифри із звіщенням:  $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}^2$ . Тоді результат вимірювання округлюється до того ж розряду, що й розряд похибки, тобто до десятих:  $g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$ . Відповідь за підсумками експерименту слід подати у вигляді:  $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2$ . Відповідно істинне значення прискорення вільного падіння міститься в інтервали від  $9,5 \text{ м/с}^2$  до  $9,9 \text{ м/с}^2$  (рис. 2.5).

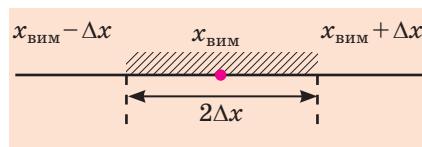


Рис. 2.4. Абсолютна похибка визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини

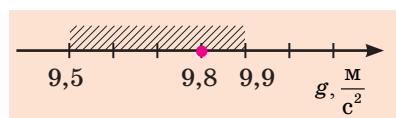


Рис. 2.5. Табличне значення:  $g_{\text{табл}} = 9,8 \text{ м/с}^2$  — належить до інтервалу  $[9,5; 9,9] \text{ м/с}^2$ , тому можна сказати, що результат експерименту ( $g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$ ) збігає з табличним у межах похибки вимірювань



## Підбиваємо підсумки

• Фізичне дослідження — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики. Існують два методи фізичних досліджень: теоретичний та експериментальний. В основі будь-якого теоретичного дослідження лежить ідеалізований об'єкт — фізична модель.

• У ході будь-якого вимірювання обов'язково є похибки: випадкові, пов'язані з процесом вимірювання, і систематичні, пов'язані з вибором пристрію для вимірювання.

• Абсолютна похибка експерименту визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини, та обчислюється за формулою:  $\Delta x = \Delta x_{\text{вип}} + \Delta x_{\text{прил}}$ . Відносна похибка характеризує якість вимірювання, дорівнює відношенню абсолютної похибки до середнього значення вимірюваної величини і подається у відсотках:  $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$ .

## Контрольні запитання



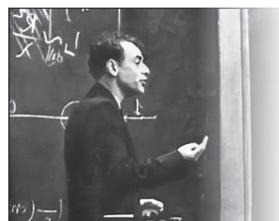
1. Назвіть основні методи фізичних досліджень. Наведіть приклади.
2. Наведіть приклади фізичних моделей. Чому фізична модель — це ідеалізований об'єкт?
3. Назвіть основні одиниці СІ та відповідні їм фізичні величини.
4. Які види похибок вимірювань ви знаєте?
5. Як визначити випадкову похибку вимірювання?
6. Чим визначається абсолютнона систематична похибка?
7. Що називають відносною похибкою вимірювання?
8. Як правильно округлити й записати результати вимірювань?

## Вправа № 2



1. Щоб довести закон збереження механічної енергії, провели експеримент. За отриманими даними середня енергія системи тіл до взаємодії дорівнювала 225 Дж, а після взаємодії — 243 Дж. Оцініть відносну похибку експерименту.
2. Визначаючи діаметр дроту за допомогою штангенциркуля, вимірювання проводили чотири рази. Було одержано такі результати:  $d_1 = 2,2$  мм;  $d_2 = 2,1$  мм;  $d_3 = 2,0$  мм;  $d_4 = 2,0$  мм. 1) Обчисліть середнє значення діаметра дроту, випадкову похибку вимірювання, абсолютнону та відносну похибки вимірювання. 2) Округліть одержані результати й запишіть результат вимірювання.

## § 3. СКАЛЯРНІ І ВЕКТОРНІ ВЕЛИЧИНИ



Л. Д. Ландау (1908–1968), лауреат Нобелівської премії з фізики

До розуміння того, що для описування природи потрібно використовувати мову математики, учні дійшли давно. Власне, певні розділи математики було створено для того, щоб описувати природу стислою й доступною мовою. Так, для визначення миттєвої швидкості, роботи змінної сили, об'єму тіл неправильної форми та ін. було створено диференціальне та інтегральне числення. Для наочнішого описування фізичних процесів навчилися будувати графіки функцій, а для швидкої обробки результатів експерименту придумали методи наближених обчислень. Згадаємо скалярні та векторні величини, без яких вам не обйтися в ході вивчення курсу фізики 10 класу.

## 1

## Скалярні і векторні величини

Фізичні величини, які використовують у фізиці для кілької характеристики фізичних явищ і об'єктів, поділяються на два великих класи: *скалярні величини* і *векторні величини*.

До *скалярних величин*, або *скалярів* (від латин. *scalaris* — східчастий), належать величини, які визначаються тільки значенням. Наприклад, маса тіла — скалярна величина, і якщо ми говоримо, що маса тіла дорівнює двом кілограмам ( $m=2$  кг), то повністю визначаємо цю величину. *Додати дві скалярні фізичні величини означає додати їх значення, подані в одинакових одиницях.* Зрозуміло, що додавати можна тільки однорідні скаляри (наприклад, не можна додавати масу до часу, а густину до роботи тощо).

Для визначення *векторних величин* важливо знати не тільки їх значення, але й напрямки. Вектор (від латин. *vector* — носій) — це *напрямлений відрізок, тобто відрізок, що має і довжину, і напрямок*. Довжину напрямленого відрізка називають *модулем вектора*. Позначають векторні величини літерами грецького та латинського алфавітів, над якими поставлено стрілки, або напівжирними літерами.

Наприклад, швидкість записують так:  $\vec{v}$  або  $v$ ; модуль вектора швидкості відповідно позначають як  $v$ .

Правила додавання (віднімання) векторів відрізняються від правил додавання (віднімання) скалярних величин.

*Суму двох векторів визначають за правилом паралелограма або за правилом трикутника* (рис. 3.1, 3.2). Як визначити суму кількох векторів, показано на рис. 3.3, як визначити різницю двох векторів, показано на рис. 3.4.

У результаті множення векторної величини  $\vec{a}$  на скалярну величину  $k$  виходить вектор  $\vec{c}$  (рис. 3.5).

*Зверніть увагу!* Одиниця добутку векторної і скалярної величин визначається як добуток одиниці однієї величини на одиницю іншої. Наприклад, потрібно знайти переміщення літака, який протягом 0,5 год летить на північ зі швидкістю 500 км/год. Вектор переміщення:  $\vec{s} = \vec{v}t$ . Оскільки  $t > 0$ , то вектор переміщення  $\vec{s}$  буде напрямлений у той самий бік, що і вектор швидкості  $\vec{v}$ , а модуль вектора переміщення дорівнюватиме:  $s = vt = 500 \text{ км/год} \cdot 0,5 \text{ год} = 250 \text{ км}$ .

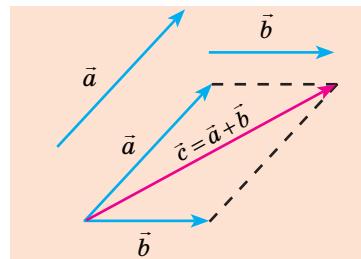


Рис. 3.1. Визначення суми двох векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  за правилом паралелограма:  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$

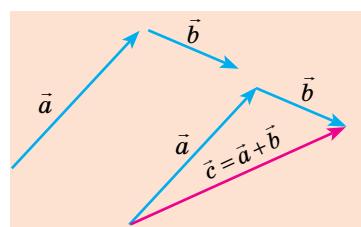


Рис. 3.2. Визначення суми двох векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  за правилом трикутника:  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$

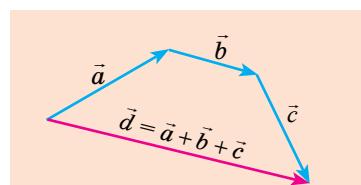
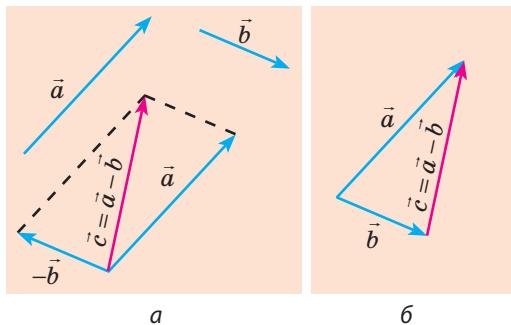


Рис. 3.3. Визначення суми трьох векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  і  $\vec{c}$ :  $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$



**Рис. 3.4.** Два способи визначення різниці двох векторів:  $a$  — до вектора  $\vec{a}$  додають вектор, протилежний вектору  $\vec{b}$ , тобто:  $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{b}) \Rightarrow \vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ ;  $b$  — вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  розміщують так, щоб вони виходили з однієї точки, вектор  $\vec{c}$ , що з'єднує кінець вектора  $\vec{b}$  із кінцем вектора  $\vec{a}$ , і є вектором різниці векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , тобто  $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$

Вектори  $\vec{c}$  і  $\vec{a}$  співнапрямлені, якщо  $k > 0$ .

$$\vec{a}$$

$$\vec{c} = k\vec{a}$$

Вектори  $\vec{c}$  і  $\vec{a}$  напрямлені протилежно, якщо  $k < 0$ .

$$\vec{a}$$

$$\vec{c} = k\vec{a}$$

**Рис. 3.5.** Визначення добутку вектора  $\vec{a}$  на скаляр  $k$ : модуль вектора  $\vec{c}$  дорівнює добутку модуля скаляра і модуля вектора  $\vec{a}$ , тобто  $c = |k| |a|$

## 2

### Як знайти проекції вектора на осі координат

Із векторами здійснювати математичні операції набагато складніше, ніж зі скалярами, тому в ході розв'язування задач від векторних фізичних величин переходятять до їх проекцій на осі координат.

Нехай вектор  $\vec{a}$  лежить у площині  $XOY$  (рис. 3.6). Опустимо з точки  $A$  (початок вектора  $\vec{a}$ ) і точки  $B$  (кінець вектора  $\vec{a}$ ) перпендикуляри на вісь  $OX$ . Основи цих перпендикулярів — точки  $A_1$  і  $B_1$  — це проекції точок  $A$  і  $B$  на вісь  $OX$ , а відрізок  $A_1B_1$  — проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $OX$ . Проекцію вектора позначають тією самою літерою, що й вектор, із зазначенням у нижньому індексі осі, наприклад:  $a_x$ . Якщо з кінців вектора  $\vec{a}$  побудувати перпендикуляри до осі  $OY$ , дістанемо відрізок  $A_2B_2$  — проекцією вектора  $\vec{a}$  на вісь  $OY$  ( $a_y$ ).

Знак проекції вектора залежить від напрямків вектора й осі координат. Проекція вектора на вісь координат вважається *додатною*, якщо від проекції початку вектора до проекції його кінця треба рухатися в напрямку осі координат; проекція вектора вважається *від'ємною*, якщо від проекції початку вектора до проекції кінця вектора треба рухатися проти напрямку осі координат (див. рис. 3.6).

У загальному випадку проекцію вектора визначають звичайними геометричними методами (рис. 3.7, а). На практиці часто доводиться мати справу з випадками, коли вектор паралельний осі координат або перпендикулярний до неї. Якщо вектор паралельний осі координат, а його напрямок збігається з напрямком осі, то його проекція на цю вісь додатна й дорівнює модулю вектора (рис. 3.7, б). Якщо напрямок вектора протилежний напрямку осі координат, то його проекція на цю вісь дорівнює модулю вектора, взятому з протилежним знаком (рис. 3.7, в). Якщо ж вектор перпендикулярний до осі координат, то його проекція на цю вісь дорівнює нулю (рис. 3.7, г).

Дуже важливою властивістю проекцій є те, що проекція суми двох векторів (рис. 3.8) або кількох векторів на координатну вісь дорівнює

алгебраїчній сумі проекцій цих векторів на дану вісь. Саме ця властивість дозволяє замінювати в рівнянні векторні величини їх проекціями — скалярними величинами і далі розв'язувати одержане рівняння звичайними алгебраїчними методами.



### Підбиваємо підсумки

- Фізичні величини поділяються на скалярні і векторні.
- Додати дві скалярні величини означає додати їх значення. Додавати можна скалярні величини, подані в одних одиницях.
- Векторні величини мають значення (модуль) і напрямок.
- Суму векторів визначають за правилом паралелограма або за правилом трикутника.



### Контрольні запитання

1. Які фізичні величини називають скалярними? векторними? Наведіть приклади.
2. Як знайти суму векторів? різницю векторів? добуток вектора та скаляра?
3. Як знайти проекції вектора на осі координат?



### Вправа № 3

1. Чи можна додавати площе і об'єм? вектор імпульсу й енергію? вектор швидкості і вектор сили? енергію і роботу? Чому?
2. Перенесіть у зошит рис. 1. Для кожного випадку знайдіть суму та різницю двох векторів.
3. Знайдіть проекції векторів на осі координат (рис. 2).

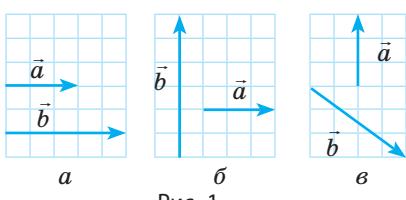


Рис. 1

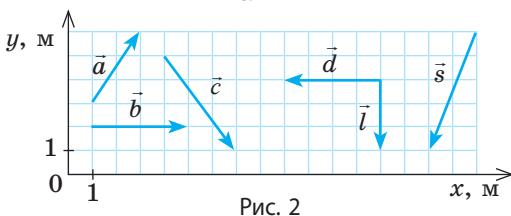
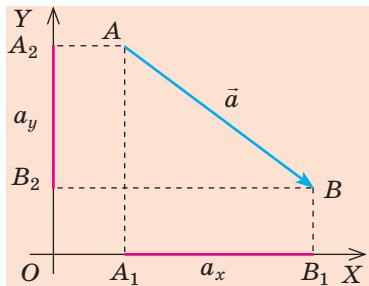
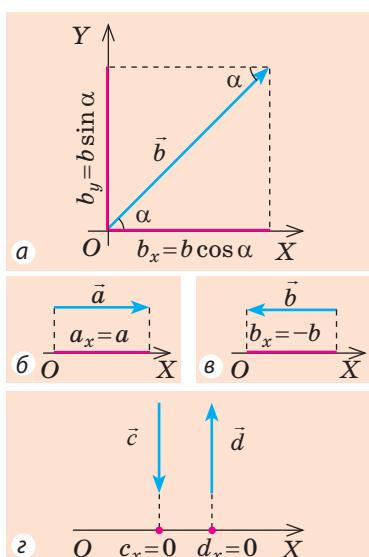


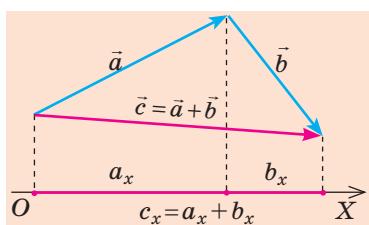
Рис. 2



**Рис. 3.6.** Визначення проекцій вектора на осі координат:  $a_x$  — проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $OX$ ,  $a_x > 0$ ;  $a_y$  — проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $OY$ ,  $a_y < 0$



**Рис. 3.7.** Визначення проекцій вектора на осі координат



**Рис. 3.8.** Проекція суми векторів дорівнює сумі проекцій векторів, що додаються: якщо  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ , то  $c_x = a_x + b_x$

# РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

## ЧАСТИНА 1. КІНЕМАТИКА



### § 4. ОСНОВНА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ. АБЕТКА КІНЕМАТИКИ

Уявіть, що виникла аварійна ситуація, коли на одній колії опинилися два поїзди: товарний рухається зі швидкістю 50 км/год, а позаду нього, на відстані 1 км, іде експрес зі швидкістю 70 км/год. Машиніст експреса починає гальмувати. Чи є неминучою катастрофа? Скільки часу потрібно експресу для зупинки? Який шлях подолає за цей час товарний поїзд? Яку найменшу відстань має подолати експрес до зупинки? Від чого це залежить? Згадаємо, що на ці та багато інших подібних питань відповідає розділ фізики, який називають «Механіка».

1

#### Що вивчає механіка

**Механіка** — наука про механічний рух матеріальних тіл і про взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами.

**Основна задача механіки** — пізнати закони механічного руху тіл, взаємодій між тілами, передбачати поведінку тіл на основі законів механіки, визначати механічний стан тіла (координати та швидкість руху) в будь-який момент часу (див., наприклад, [рис. 4.1](#)).

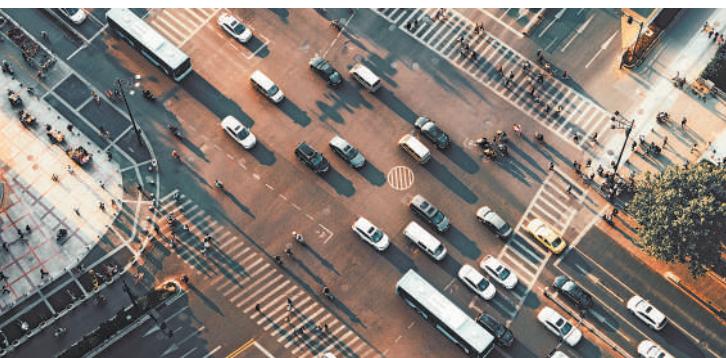
Механіка у своєму складі має кілька розділів, зокрема **кінематику** — *розділ механіки, який вивчає рух тіл і при цьому не розглядає причин, якими цей рух викликаний*. Інакше кажучи, кінематика не відповідає на запитання на зразок: «Чому саме через 2 км зупиниться експрес?», — вона тільки описує рух. А от причини зміни руху тіл розглядає *розділ механіки, який називають динаміка*.

2

#### Складники системи відліку

**Механічний рух** — зміна з часом положення тіла (або частин тіла) в просторі відносно інших тіл.

Тіло, відносно якого розглядають рух усіх інших тіл, про які йдеться в певній задачі, називають *тілом відліку*. Щоб визначити положення тіла в просторі в даний момент часу, з *тілом відліку пов'язують систему координат*, яку задають за допомогою однієї, двох або трьох координатних осей (відповідно одновимірну, двовимірну або тривимірну систему координат), *і пристрій для відліку часу* (годинник, секундомір тощо).



**Рис. 4.1.** На перехресті не відбулося жодної дорожньо-транспортної пригоди, оскільки всі учасники руху правильно розв'язали основну задачу механіки

Тіло відліку, пов'язані з ним система координат і прилад для відліку часу утворюють **систему відліку** (див. рис. 4.2).

Доки не обрано систему відліку, неможливо стверджувати, рухається тіло чи перебуває в стані спокою. Наприклад, люди, що сидять у тролейбусі, не рухаються відносно одне одного, але разом із тролейбусом вони рухаються відносно полотна дороги.

?

Розгляньте рис. 4.2. Назвіть тіла або частини тіл, які здійснюють механічний рух. Відносно яких тіл ви розглядали ці рухи?

### 3 Коли розмірами тіла можна знехтувати

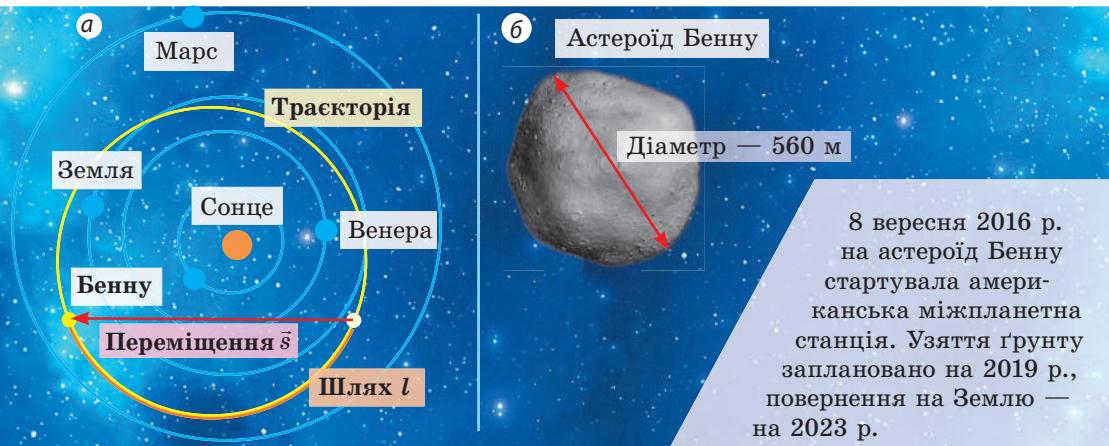
Будь-яке фізичне тіло складається з величезної кількості частинок. Наприклад, в  $1\text{ см}^3$  води міститься понад  $3 \cdot 10^{22}$  молекул. Це в багато разів більше, ніж кількість людей на Землі ( $7,6 \cdot 10^9$ , або 7,6 млрд осіб). А щоб визначити розташування тіла в просторі, потрібно, говорячи строго, визначити розташування кожної його точки. Тож як розв'язати основну задачу механіки? З попереднього курсу фізики ви знаєте, що досить часто тіло уявно замінюють його фізичною моделлю — *матеріальною точкою*. Матеріальна точка не має розмірів, а її маса дорівнює масі тіла.



**Рис. 4.2.** Складники системи відліку: тіло відліку, система координат, прилад для відліку часу

**Матеріальна точка** — це фізична модель тіла, розмірами якого в умовах задачі можна знехтувати.

Те саме тіло в умовах однієї задачі можна вважати матеріальною точкою, а в умовах іншої — не можна (див. рис. 4.3). Далі, якщо не буде спеціальних застережень, розглядаючи рух тіла та визначаючи його координати, *вважатимемо дане тіло матеріальною точкою*.



**Рис. 4.3.** Досліджуючи рух астероїда Бенну по орбіті, розміром астероїда можна знехтувати та вважати його матеріальною точкою (а); плануючи спуск на астероїд робота, розмірами астероїда нехтувати не можна (б)

Уявну лінію, в кожній точці якої послідовно перебувала матеріальна точка під час руху, називають **траєкторією руху**. Наприклад, траєкторією руху астероїда Бенну є еліпс (жовта лінія на рис. 4.3, а). **Шлях** — це фізична величина, яка дорівнює довжині траєкторії або довжині її певної ділянки.

Якщо визначити довжину ділянки траєкторії, яку описав астероїд, наприклад, за три земні місяці, знайдемо шлях  $l$ , який подолав астероїд за цей час ( $l \approx 262$  млн км) (оранжево-жовта лінія на рис. 4.3, а). **Шлях** — це фізична величина, яка дорівнює довжині траєкторії або довжині її певної ділянки.

#### 4 Переміщення. Проекція переміщення

З'єднаємо напрямленим відрізком (вектором) положення астероїда на момент початку спостереження з його положенням наприкінці спостереження (див. рис. 4.3, а). Цей вектор — **переміщення астероїда** за даний інтервал часу.

**Переміщення**  $\vec{s}$  — це векторна величина, яку графічно подають у вигляді напрямленого відрізка прямої, який з'єднує початкове і кінцеве положення матеріальної точки.

Переміщення вважають заданим, якщо відомі **напрямок** і **модуль переміщення**. Модуль переміщення  $s$  — це довжина вектора переміщення.

**Одиниця модуля переміщення в СІ** — метр:

$$[s] = 1 \text{ м (m)}^*.$$

\* Тут і далі в дужках наведено міжнародні позначення одиниць СІ.

У більшості випадків вектор переміщення не напрямлений уздовж траєкторії руху тіла: шлях, пройдений тілом, зазвичай більший, ніж модуль переміщення (див. рис. 4.3, а). Шлях і модуль переміщення виявляються рівними, тільки коли тіло рухається вздовж прямої в незмінному напрямку.



Наведіть приклади руху тіл, за якого:

- шлях дорівнює модулю переміщення;
- шлях є більшим за модуль переміщення;
- модуль переміщення дорівнює нулю.

Якщо відомі початкові координати і переміщення тіла на даний момент часу, можна визначити положення тіла в цей момент часу, тобто *розв'язати основну задачу механіки*. Однак за формулами, записаними у векторному вигляді, здійснювати обчислення доволі складно, адже в цьому випадку доводиться постійно враховувати напрямки векторів. Тому для розв'язування задач використовують *проекції вектора переміщення на осі координат* (рис. 4.4).

## 5

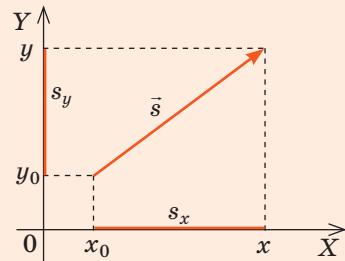
### У чому полягає відносність механічного руху

Траєкторія, шлях, переміщення, а отже, швидкість руху тіла залежать від вибору системи відліку — в цьому полягає **відносність механічного руху**.

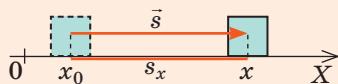
Переконайтесь у відносності механічного руху: розгляніть рух точки  $A$  на лопаті гвинта гелікоптера під час його вертикального зльоту, прийнявши, що за час спостереження гвинт гелікоптера зробив три оберти (рис. 4.5).

- У будь-який момент часу координати тіла можна визначити за формулами:

$$x = x_0 + s_x; \quad y = y_0 + s_y$$



- $s_x = s$ , якщо напрямок переміщення збігається з напрямком осі координат:



- $s_x = -s$ , якщо напрямок переміщення протилежний напрямку осі координат:

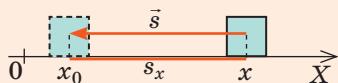
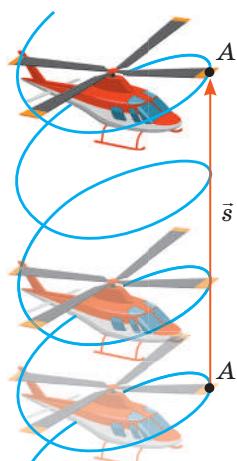


Рис. 4.4. Координатний метод визначення положення тіла



Система відліку «Гелікоптер»:

- траєкторія руху точки  $A$  — коло;
- шлях  $l$  — три довжини кола:  $l = 3 \cdot 2\pi R$ ;
- модуль переміщення  $s = 0$ .



Система відліку «Земля»:

- траєкторія руху точки  $A$  — гвинтова лінія;
- шлях  $l$  — довжина гвинтової лінії;
- модуль переміщення  $s$  — висота, на яку піднявся гелікоптер:  $s = h$ .

Рис. 4.5. Траєкторія, шлях і переміщення гелікоптера в різних системах відліку



Нам здається очевидним, що час руху тіла не залежить від вибору системи відліку. Тобто *інтервал часу між двома даними подіями в усіх системах відліку має те саме значення*. Це твердження — одна з найважливіших аксіом класичної механіки. І це дійсно так, але тільки тоді, коли швидкість руху тіла є набагато меншою за швидкість поширення світла (рух саме з такими швидкостями розглядають у *класичній механіці*).

Якщо швидкість руху тіла порівнянна зі швидкістю поширення світла, то час для цього тіла сповільнюється. Рух зі швидкостями, які порівнянні зі швидкістю поширення світла, розглядають у *релятивістській механіці*.

## 6 Згадуємо види механічного руху

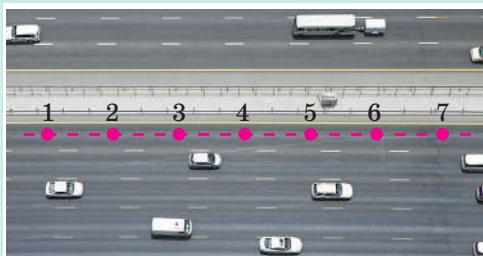
Ви знаєте, що *за характером руху* розрізняють *рівномірний* і *нерівномірний* рухи, *за формою траєкторії* — *прямолінійний* і *криволінійний* рухи.

Уважно розгляніть таблицю нижче та дайте означення деяких механічних рухів: рівномірного прямолінійного, рівномірного криволінійного, нерівномірного прямолінійного, нерівномірного криволінійного. Наведіть власні приклади таких рухів. (Червоні точки в таблиці показують положення тіла через деякі рівні інтервали часу.)

**Рівномірний рух** — рух, під час якого матеріальна точка за будь-які рівні інтервали часу долає однаковий шлях

### Прямолінійний рух

Траєкторія руху — пряма лінія



### Криволінійний рух

Траєкторія руху — крива лінія



**Нерівномірний рух** — рух, під час якого матеріальна точка за рівні інтервали часу долає різний шлях

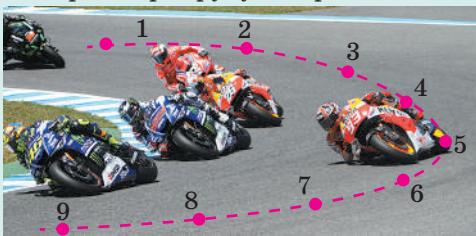
### Прямолінійний рух

Траєкторія руху — пряма лінія



### Криволінійний рух

Траєкторія руху — крива лінія





## Підбиваємо підсумки

- Механіка — наука про механічний рух матеріальних тіл і про взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами. Основна задача механіки — пізнати закони руху та взаємодії матеріальних тіл, на основі цих законів передбачати поведінку тіл та визначати механічний стан тіл у будь-який момент часу.
- Механічний рух — зміна з часом положення тіла (або частин тіла) в просторі відносно інших тіл. Розв'язуючи задачу про механічний рух, обов'язково слід обрати систему відліку: тіло відліку, пов'язані з ним систему координат і прилад для відліку часу.
- Матеріальна точка — це фізична модель тіла, розмірами якого в умовах задачі можна знехтувати. Маса матеріальної точки збігається з масою тіла.

Лінію руху матеріальної точки в просторі називають траекторією.

Координати матеріальної точки у двовимірній системі координат обчислюють за формулами:  $x = x_0 + s_x$ ;  $y = y_0 + s_y$ .

- Шлях  $l$  — це фізична величина, що чисельно дорівнює довжині траекторії руху матеріальної точки за даний інтервал часу.

Переміщення  $s$  — це векторна величина, яку графічно подають у вигляді напрямленого відрізка прямої, проведеної з початкового положення матеріальної точки до її кінцевого положення.

Одиниця шляху та модуля переміщення в СІ — метр (м).

- Траекторія руху, шлях і переміщення тіла залежать від вибору системи відліку — в цьому полягає відносність механічного руху.



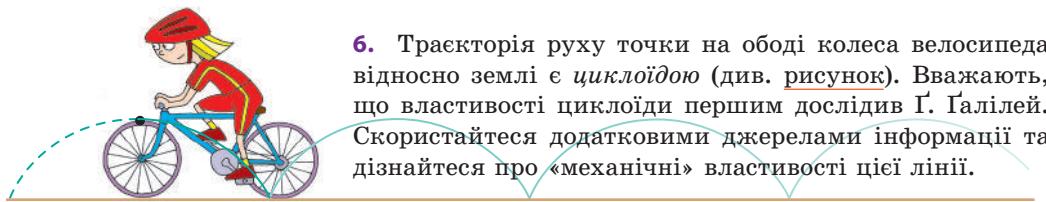
## Контрольні запитання

1. Що вивчає механіка?
2. Якою є основна задача механіки?
3. Дайте означення механічного руху.
4. Наведіть приклади різних механічних рухів.
5. Назвіть складники системи відліку.
6. Які види систем координат ви знаєте?
7. У яких випадках тіло, що рухається, можна розглядати як матеріальну точку?
8. Опишіть шлях і переміщення за планом характеристики фізичної величини (див. форзац підручника).
9. У чому полягає відносність механічного руху?



## Вправа № 4

1. Яку систему координат (одновимірну, двовимірну, тривимірну) ви оберете, описуючи такі рухи: підйом ліфта; рух човна по поверхні води; біг футбольіста на полі; політ метелика; спуск спортсменки з гори на лижах?
2. Назвіть декілька тіл відліку, відносно яких ви зараз рухаєтесь. У якому напрямку відбувається цей рух?
3. Із яким тілом потрібно пов'язати систему відліку, щоб ваші шлях і переміщення в будь-який момент часу дорівнювали нулю? Чи зручно буде ця система відліку для опису вашого руху?
4. Автомобіль рухається на повороті дороги, який являє собою чверть дуги кола радіуса 20 м. Визначте шлях і модуль переміщення автомобіля за час повороту.
5. Із повітряної кулі, що летить горизонтально, впав невеликий важкий предмет. Якою буде траекторія руху цього предмета відносно кулі? відносно людини, яка спостерігає за рухом кулі, сидячи на галівині?



6. Траєкторія руху точки на ободі колеса велосипеда відносно землі є *циклоїдою* (див. рисунок). Вважають, що властивості циклоїді першим дослідив Г. Галілей. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про «механічні» властивості цієї лінії.



### Експериментальне завдання

Скориставшись мобільним пристроєм і відповідною програмою, прокладіть траєкторію руху від вибраного вами будинку до школи. Визначте шлях, який при цьому буде подоланий, напрямок і модуль переміщення.



## § 5. ШВИДКІСТЬ РУХУ. СЕРЕДНЯ І МИТТЄВА ШВИДКОСТІ. ЗАКОНИ ДОДАВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ І ШВИДКОСТЕЙ



Чи перепливали ви річку зі швидкою течією? Дуже важко перепливти її так, щоб потрапити на протилежний берег прямо навпроти місця запливу. А хтось намагався піднятися ескалатором, що рухається вниз? Теж складно. Набагато швидше піднятися, якщо рухатися в бік руху ескалатора. У кожному з наведених прикладів людина бере участь водночас у двох рухах. Як при цьому розрахувати швидкість її руху, ви довідаєтесь із цього параграфа. Але спочатку згадаємо, що таке швидкість.

### 1

#### Згадуємо рівномірний прямолінійний рух тіла

Найпростіший вид механічного руху — *рівномірний прямолінійний рух*.

**Рівномірний прямолінійний рух** — це такий механічний рух, під час якого тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.

Із означення рівномірного прямолінійного руху випливає:

- для опису цього руху достатньо скористатись одновимірною системою координат, адже траєкторія руху — пряма;
- відношення переміщення  $\vec{s}$  до інтервалу часу  $t$ , за який це переміщення відбулося, для такого руху є незмінною величиною, адже за рівні інтервали часу тіло здійснює однакові переміщення.

Векторну фізичну величину, яка дорівнює відношенню переміщення  $\vec{s}$  до інтервалу часу  $t$ , за який це переміщення відбулося, називають **швидкістю рівномірного прямолінійного руху тіла**:

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

Напрямок вектора швидкості руху збігається з напрямком переміщення тіла, а модуль і проекцію швидкості визначають за формулами:

$$v = \frac{s}{t} \quad ; \quad v_x = \frac{s_x}{t}$$

Одниниця швидкості руху в СІ — метр за секунду:

$$[v] = 1 \text{ м/с (m/s).}$$

Із формули для визначення швидкості руху тіла можна знайти переміщення тіла за будь-який інтервал часу:

$$\vec{s} = \vec{v}t$$

Останню формулу будемо записувати для проекцій:  $s_x = v_x t$  або для модулів:  $s = vt$ . Оскільки в даному випадку швидкість руху тіла не змінюється з часом, то переміщення, яке здійснює тіло, прямо пропорційне часу:

$$s \sim t; s_x \sim t.$$

Для розв'язання основної задачі механіки — визначення механічного стану тіла в будь-який момент часу — запишемо рівняння координати. Оскільки  $x = x_0 + s_x$ , а  $s_x = v_x t$ , для рівномірного прямолінійного руху рівняння координати має вигляд:

$$x = x_0 + v_x t ,$$

де  $x_0$  — початкова координата;  $v_x$  — проекція швидкості\*;  $t$  — час спостереження.

Для описання руху зручно використовувати графіки (рис. 5.1) — вони так само повно описують рух тіл, як і відповідні формули або словесний опис.



Розгляніть рис. 5.1. З якою швидкістю рухається автомобіль? велосипед? Яким буде їх переміщення за 4 с спостереження? На якій відстані один від одного перебуватимуть автомобіль і велосипед через 4 с після початку спостереження?

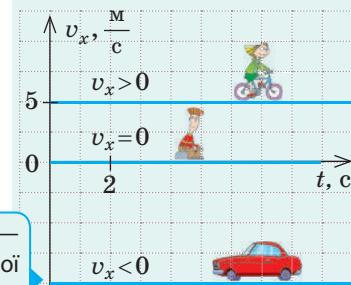
2

## Яку швидкість показує спідометр

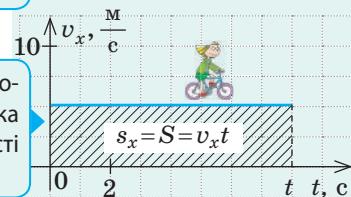
Нерівномірний рух характерізується *середньою шляховою швидкістю*, *середньою векторною швидкістю*, *миттєвою швидкістю* (див. таблицю на с. 28–29).

\* Тут і далі мається на увазі проекція швидкості на вісь, яку зазначено в нижньому індексі.

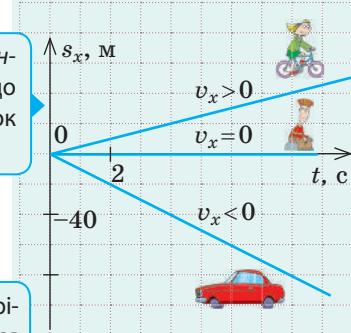
Графік проекції швидкості — відрізок прямої, паралельної осі часу, адже швидкість руху не змінюється з часом



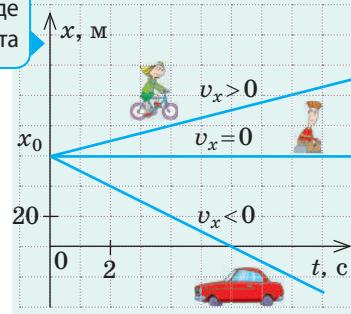
Переміщення чисельно дорівнює площі прямокутника під графіком залежності  $v_x(t)$



Графік проекції переміщення — відрізок прямої, що проходить через початок координат, оскільки  $s_x \sim t$



Графік координати — відрізок прямої, що починається в точці  $(t = 0; x = x_0)$ , де  $x_0$  — початкова координата



**Рис. 5.1.** Графіки рівномірного прямолінійного руху. Велосипед і автомобіль рухаються вздовж осі  $OX$ : велосипед — у напрямку осі  $OX$ , автомобіль — у протилежному напрямку. Турист сидить на узбіччі

## Характеристика середньої шляхової, середньої векторної,

**Середня шляхова швидкість**

Скалярна фізична величина

Дорівнює відношенню всього шляху  $l$  до інтервалу часу  $t$ , за який цей шлях подолано

$$v_{\text{cep}} = \frac{l}{t} \quad \frac{\text{Увесь шлях}}{\text{Увесь час спостереження}}$$

Не має напрямку

**Середня векторна швидкість**

Векторна фізична величина

Дорівнює відношенню переміщення  $\vec{s}$  до інтервалу часу  $t$ , за який це переміщення здійснено

$$\vec{v}_{\text{cep}} = \frac{\vec{s}}{t} \quad \frac{\text{Усе переміщення}}{\text{Увесь час спостереження}}$$

Напрямок збігається з напрямком переміщення:  $\vec{v}_{\text{cep}} \uparrow\uparrow \vec{s}$ 

Знання середньої швидкості не дозволяє правильно описати весь рух. Наведемо приклад. Із міркувань безпеки в населених пунктах України встановлено обмеження швидкості руху транспортних засобів 50 км/год. Якщо водій 10 хв мчить зі швидкістю 80 км/год, а наступні 10 хв «повзе в тягнучці» зі швидкістю 20 км/год, середня швидкість руху автомобіля не перевищує 50 км/год, разом із тим швидкісний режим водієм було порушенено, і рух автомобіля навряд чи можна вважати безпечним.

Далі, говорячи про швидкість руху тіла, матимемо на увазі його миттєву швидкість.

Під час прямолінійного рівномірного руху миттєва швидкість увесь час залишається незмінною та збігається із середньою векторною швидкістю руху тіла. У будь-якому іншому випадку миттєва швидкість руху тіла змінюється: *за напрямком* — під час криволінійного рівномірного руху; *за значенням, інколи за напрямком* (напрямок може змінюватися на протилежний) — під час прямолінійного нерівномірного руху; *за напрямком і значенням* водночас під час криволінійного нерівномірного руху.



Яку швидкість руху показує спідометр: середню векторну? середню шляхову? миттєву?

**3 Як визначити швидкість руху тіла відносно різних систем відліку**

Розглянемо рух тіла в різних системах відліку (СВ). Нехай таким тілом буде собака, який рухається рівномірно прямолінійно по плоту, що пливе річкою (рис. 5.2). Очевидно, що швидкість руху плоту дорівнює швидкості течії річки. За рухом собаки стежать спостерігач і спостерігачка, причому

## миттєвої швидкості

## Миттєва швидкість

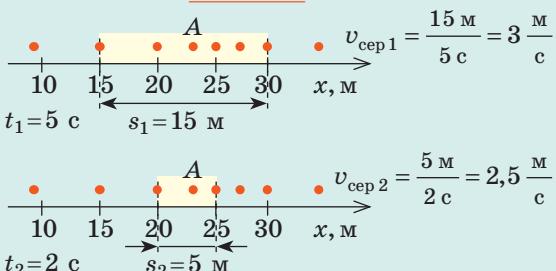
## Векторна фізична величина

Швидкість руху в даний момент часу, в даній точці; середня векторна швидкість, вимірювана за нескінченно малий інтервал часу

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} \quad \Delta \vec{s} \text{ — переміщення за дуже малий інтервал часу } (\Delta t \rightarrow 0)$$

Напрямок збігається з напрямком переміщення в даний момент часу:  $\vec{v} \uparrow\uparrow \Delta \vec{s}$

Чим меншим є інтервал часу, за який вимірюється середня швидкість руху, тим більше її значення наближається до значення миттєвої швидкості (на рисунках нижче — в точці A):



Час між послідовними положеннями тіла — 1 с

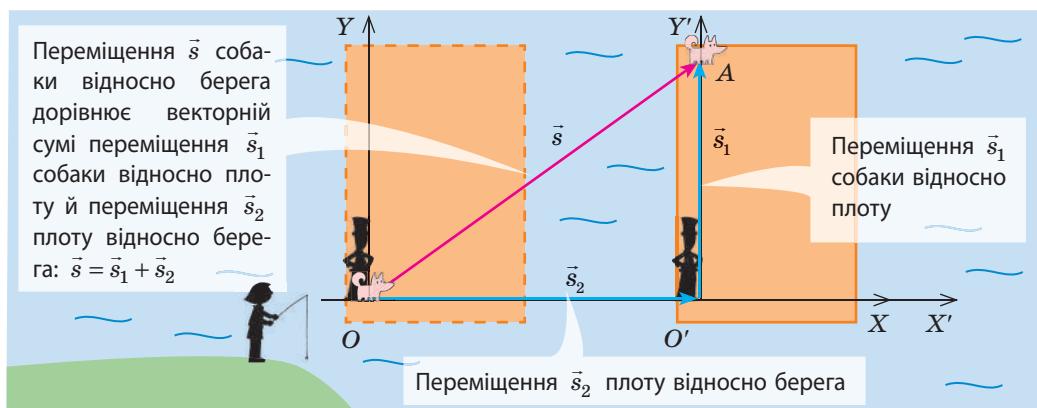
спостерігачка (рибалка) перебуває на березі, а спостерігач (разом із собакою) — на плоту. Спостерігач і спостерігачка вимірюють переміщення собаки та час його руху. Час руху собаки для обох осіб одинаковий, а от переміщення відрізняються. Припустімо, що за якийсь час  $t$  собака перебіг на інший край плоту.

Переміщення  $\vec{s}_1$ , яке здійснив собака відносно плоту (і яке вимірює спостерігач), приблизно дорівнює за модулем ширині плоту і напрямлене перпендикулярно до течії річки.

Переміщення  $\vec{s}$ , здійснене собакою відносно берега (і яке вимірює рибалка), дорівнює за модулем довжині відрізка  $OA$  і напрямлене під певним кутом до течії річки.

Власне пліт за цей час змістився за течією і здійснив переміщення  $\vec{s}_2$  відносно берега.

Із рис. 5.2 бачимо:  $\vec{s} = \vec{s}_2 + \vec{s}_1$ . Пов'яжемо з берегом систему координат  $XOY$  — отримаємо *нерухому систему відліку*. Із плотом пов'яжемо систему координат  $X'O'Y'$  — отримаємо *рухому систему відліку*.



Переміщення  $\vec{s}_2$  плоту відносно берега

Переміщення  $\vec{s}_1$  собаки відносно плоту

Рис. 5.2. До виведення закону додавання переміщень і швидкостей

Тепер можна сформулювати **закон додавання переміщень**:

Переміщення  $\vec{s}$  тіла в нерухомій системі відліку дорівнює геометричній сумі переміщення  $\vec{s}_1$  тіла в рухомій системі відліку та переміщення  $\vec{s}_2$  рухомої системи відліку відносно нерухомої:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

Поділивши обидві частини рівняння на час руху  $\left( \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t} \right)$  і врахувавши, що  $\vec{s} / t = \vec{v}$ , отримаємо **закон додавання швидкостей**:

Швидкість  $\vec{v}$  руху тіла в нерухомій системі відліку дорівнює геометричній сумі швидкості  $\vec{v}_1$  руху тіла в рухомій системі відліку та швидкості  $\vec{v}_2$  руху рухомої системи відліку відносно нерухомої:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

*Зверніть увагу!* Оскільки рух і спокій є відносними, то в наведеному вище прикладі як нерухому СВ можна було обрати й СВ, пов'язану з плотом. У такому разі СВ, пов'язана з берегом, була б рухомою, а напрямок її руху був би протилежним напрямку течії.

## 4

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Рибалка перепливає річку на човні, утримуючи його перпендикулярно до напрямку течії. Швидкість  $v_1$  руху човна відносно води — 4 м/с, швидкість  $v_2$  течії річки — 3 м/с, ширина  $l$  річки — 400 м. Визначте: 1) за який час  $t$  човен перепливє річку та за який час  $t_1$  човен переплив би річку, якби не було течії; 2) модуль переміщення  $s$  і модуль швидкості  $v$  руху човна відносно берега; 3) на якій відстані  $s_2$  униз за течією від вихідної точки човен досягне протилежного берега.

*Аналіз фізичної проблеми.* Як нерухому візьмемо СВ, пов'язану із Землею, як рухому — СВ, пов'язану з водою. Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зобразимо вектори швидкості: руху човна відносно берега ( $\vec{v}$ ), руху човна відносно води ( $\vec{v}_1$ ), течії річки ( $\vec{v}_2$ ).

**Дано:**

$$v_1 = 4 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 3 \text{ м/с}$$

$$l = 400 \text{ м}$$

$$t = ?$$

$$t_1 = ?$$

$$s = ?$$

$$v = ?$$

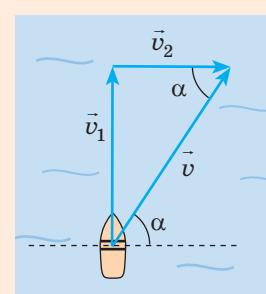
$$s_2 = ?$$

**Розв'язання**

1) У СВ, пов'язаній із водою, човен здійснив переміщення  $s_1$ , яке за модулем дорівнює ширині річки:  $s_1 = l$ . Швидкість руху човна відносно води  $v_1 = \frac{s_1}{t}$ . Отже, час руху човна:

$$t = \frac{l}{v_1}; \quad t = \frac{400 \text{ м}}{4 \text{ м/с}} = 100 \text{ с.}$$

Бачимо, що час руху човна не залежить від швидкості течії річки, тому, якби не було течії, човен переплив би річку за той самий час:  $t_1 = t = 100$  с.



2) Модуль швидкості  $v$  руху човна відносно берега знайдемо за теоремою Піфагора:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}; \quad v = \sqrt{4^2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} + 3^2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \sqrt{25 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Човен рухається рівномірно, тому переміщення  $s$  човна відносно берега:

$$s = vt; \quad s = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 500 \text{ м}.$$

3) Знаючи час  $t$  руху човна та швидкість  $v_2$  течії річки, визначимо відстань  $s_2$ ,

$$\text{на яку човен знесло вниз за течією: } s_2 = v_2 t; \quad s_2 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 300 \text{ м}.$$

Відповідь:  $t = t_1 = 1$  хв 40 с;  $s = 500$  м;  $v = 5$  м/с;  $s_2 = 300$  м.



### Підбиваємо підсумки

- Рівномірний прямолінійний рух — це механічний рух, під час якого тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.
- У випадку рівномірного прямолінійного руху:
  - графік залежності  $v_x(t)$  — відрізок прямої, паралельної осі часу;
  - проекцію переміщення тіла можна обчислити за формулою:  $s_x = v_x t$ ; графік залежності  $s_x(t)$  — відрізок прямої, який починається в початку координат;
  - рівняння координати має вигляд:  $x = x_0 + v_x t$ .
- Якщо рух тіла не є рівномірним, для його опису використовують поняття: середня векторна швидкість ( $\bar{v}_{\text{ср}} = \vec{s} / t$ ); середня шляхова швидкість ( $v_{\text{ср}} = l / t$ ); миттєва швидкість  $\vec{v}$  — середня векторна швидкість за нескінченно малий інтервал часу, швидкість руху в даний момент часу, швидкість руху в даній точці:  $v = \Delta \vec{s} / \Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ).
- Швидкість  $\vec{v}$  руху тіла в нерухомій СВ дорівнює геометричній сумі швидкості  $\vec{v}_1$  руху тіла в рухомій СВ і швидкості  $\vec{v}_2$  рухомої СВ відносно нерухомої СВ:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .

### Контрольні запитання



1. Який рух називають рівномірним прямолінійним?
2. Дайте характеристику швидкості рівномірного прямолінійного руху.
3. Як визначити переміщення та координату тіла, яке рухається рівномірно прямолінійно?
4. Який вигляд мають графіки залежності  $v_x(t)$ ;  $s_x(t)$ ;  $x(t)$  у випадку прямолінійного рівномірного руху?
5. Дайте означення середньої векторної швидкості руху; середньої шляхової швидкості руху; миттєвої швидкості руху.
6. Сформулюйте закон додавання переміщень і закон додавання швидкостей.

### Фізика в цифрах

- 1600 км/год — швидкість руху точок екватора; зумовлена обертанням Землі навколо своєї осі.
- Близько 110 000 км/год — швидкість руху Землі навколо Сонця, а отже, й усіх нас.
- Понад 780 000 км/год — швидкість, із якою Сонячна система (а отже, усі ми) летить у космічному просторі відносно центра Галактики.

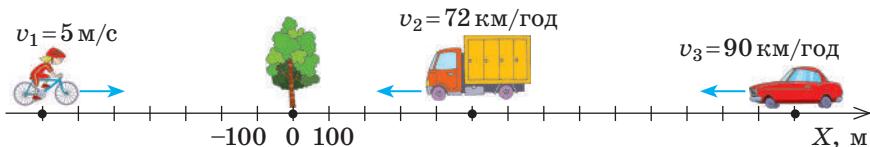
Тож з якою швидкістю ми рухаємося? Єдиної відповіді немає — все залежить від системи відліку!





### Вправа № 5

- Моторний човен рухається зі швидкістю 10 м/с відносно води. Швидкість течії річки — 1 м/с. Визначте швидкість руху моторного човна відносно берега річки під час руху човна за течією; проти течії.
- Крилата насініна набуває незмінної швидкості падіння 0,3 м/с практично відразу після початку падіння з верхівки дерева. На якій відстані від прикореневої частини стовбура впаде насініна, якщо швидкість вітру напрямлена горизонтально та дорівнює 1 м/с, а висота дерева становить 50 м? Яким є переміщення насінини відносно поверхні Землі?
- Кінь рухається ареною цирку по дузі кола радіуса 6 м, описуючи при цьому траекторію, що являє собою половину кола. Першу чверть кола кінь долає за 10 с, а другу чверть — за 20 с. Визначте середню шляхову та середню векторну швидкості руху коня на кожній ділянці траекторії та протягом усього часу руху.
- Запишіть рівняння руху для кожного транспортного засобу на рисунку. Визначте час і місце зустрічі вантажівки та велосипедистки, легкового автомобіля та велосипедистки. Де і коли легковий автомобіль обжene вантажівку? Побудуйте графіки залежності  $v_x(t)$  і  $x(t)$  для кожного тіла.



- Літак має долетіти до міста, розташованого на відстані 600 км на північ. Із заходу дме вітер зі швидкістю 40 км/год. Літак летить зі швидкістю 300 км/год відносно повітря. Яким курсом має летіти літак? Скільки часу триватиме рейс?
- Перед відправленням потяга йшов дощ. Вітру не було, і краплі дощу падали вертикально. Коли потяг рушив, пасажири помітили, що дощ став косим, хоча погода залишалася безвітряною. Поясніть це явище. Визначте швидкість падіння крапель, якщо під час руху потяга зі швидкістю 40 км/год пасажирам здається, що краплі падають під кутом  $45^\circ$  до вертикалі.
- Дізнайтесь про «рекордсменів швидкості» в сучасній техніці та в живій природі. Підготуйте повідомлення або презентацію.



### Фізика і техніка в Україні



**Архип Михайлович Люлька** (1908–1984) — видатний український радянський конструктор авіаційних двигунів, академік АН СРСР. Народився в с. Саварка Київської губернії, навчався в Київському політехнічному інституті.

Працюючи в Харківському авіаційному інституті, А. М. Люлька створив конструкцію першого в СРСР двоконтурного турбореактивного двигуна. Першим розробив турбореактивні двигуни для надзвукової авіації. Згодом на літаках із двигунами конструкції А. М. Люльки було встановлено десятки світових рекордів. Під його керівництвом створено дослідно-конструкторське бюро, яке зараз носить його ім'я. На аллії видатних учених у Київській політехніці встановлено пам'ятник А. Люльці.



## § 6. РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. ПРИСКОРЕННЯ



Існують автомобілі — їх називають драгстерами, — які мають потужність більшу, ніж літак «Боїнг». Уявляєте, яку швидкість драгстер може розвинути за дуже короткий час? Ось показники одного з драгстерів: за 0,5 с він розвинув швидкість 32 м/с, за 1,0 с — 51 м/с, за 3,8 с досяг максимальної швидкості — 143 м/с! Згадаємо, як за цими показниками знайти відстань, яку подолав драгстер.

### 1 Згадуємо рівноприскорений прямолінійний рух тіла

Якщо тіло рухається нерівномірно, швидкість його руху безперервно змінюється.

Векторну фізичну величину, яка характеризує швидкість зміни швидкості руху тіла й дорівнює відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, за який ця зміна відбулася, називають **прискоренням руху тіла**:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Із курсу фізики 9 класу ви знаєте, що **рівноприскорений прямолінійний рух** — це рух із незмінним прискоренням, тобто рух, під час якого швидкість руху тіла змінюється однаково за будь-які рівні інтервали часу.

*Прискорення рівноприскореного прямолінійного руху визначають за формулою:*

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

де  $\vec{v}_0$  — швидкість руху тіла в момент початку відліку часу (початкова швидкість);  $\vec{v}$  — швидкість руху тіла через деякий інтервал часу  $t$ .

Ми використовуватимемо дану формулу, записану в проекціях на вісь координат, наприклад на вісь  $OX$ :

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

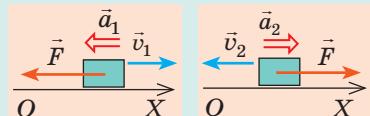
Одиниця прискорення в СІ — **метр на секунду в квадраті**:  $[a] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \left( 1 \frac{\text{м}}{\text{s}^2} \right)$ .

- *Напрямок прискорення руху тіла збігається з напрямком рівнодійної сил, які діють на тіло (див. рис. 6.1).*

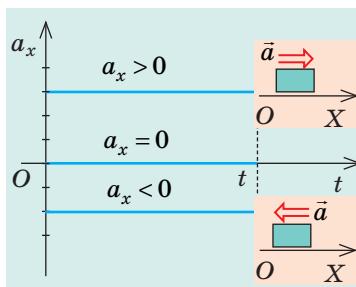
Якщо прискорення напрямлене в бік руху тіла, швидкість руху тіла збільшується (рівнодійна  $\vec{F}$  «підштовхує» та розганяє тіло).



Якщо прискорення напрямлене протилежно до руху тіла, швидкість руху тіла зменшується (рівнодійна  $\vec{F}$  «заважає» рухові та сповільнює його).



**Рис. 6.1.** Збільшення або зменшення швидкості руху тіла не залежить від вибору напрямку осі  $OX$ , а залежить від напрямку дії сили



**Рис. 6.2.** Графік залежності  $a_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху

• Якщо прискорення дорівнює нулю, швидкість руху тіла не змінюється ані за значенням, ані за напрямком:  $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0$ , тобто тіло рухається рівномірно прямолінійно. Таким чином, рівномірний прямолінійний рух — це окремий випадок рівноприскореного прямолінійного руху.

• У разі рівноприскореного руху прискорення є незмінним, тому графік проекції прискорення (графік залежності  $a_x(t)$ ) — відрізок прямої, паралельної осі часу (рис. 6.2).

2

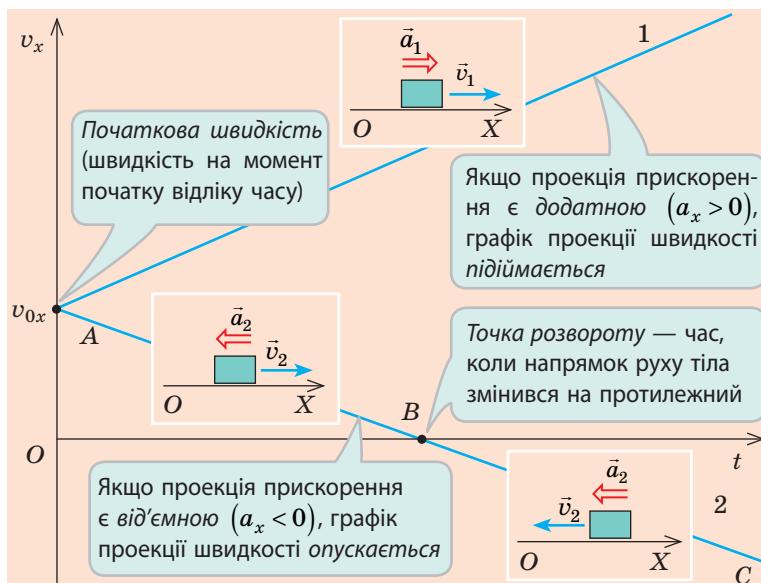
## Швидкість рівноприскореного прямолінійного руху

Із формули для визначення проекції прискорення  $\left( a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} \right)$  маємо для рівноприскореного прямолінійного руху рівняння проекції швидкості:

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

Якщо задано рівняння проекції швидкості руху тіла, то задано й початкову швидкість ( $\vec{v}_0$ ), її прискорення ( $\vec{a}$ ) руху цього тіла. Наприклад, рівняння проекції швидкості руху тіла має вигляд:  $v_x = -5 + 3t$ . Це означає:  $v_{0x} = -5$  м/с (пochаткова швидкість руху дорівнює 5 м/с, а її напрямок протилежний напрямку осі  $OX$ );  $a_x = 3$  м/с<sup>2</sup> (прискорення руху дорівнює 3 м/с<sup>2</sup>, а його напрямок збігається з напрямком осі  $OX$ ).

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. 6.3, 6.4).



**Рис. 6.3.** Графіки залежності  $v_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху. Тіло 1 весь час набирає швидкість, оскільки  $\vec{a}_1 \uparrow\uparrow \vec{v}_1$ . Тіло 2 спочатку сповільнює свій рух:  $\vec{a}_2 \uparrow\downarrow \vec{v}_2$  (ділянка  $AB$ ), потім зупиняється (точка  $B$ ), після чого набирає швидкість ( $\vec{a}_2 \uparrow\uparrow \vec{v}_2$ ), рухаючись у протилежному напрямку (ділянка  $BC$ ).

Чим більшим є прискорення руху тіла, тим більший кут  $\alpha$  нахилу графіка проекції швидкості до осі часу (див. рис. 6.4).

### 3 Переміщення під час рівноприскореного прямолінійного руху

Ви вже знаєте про геометричний зміст проекції переміщення: переміщення тіла чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності проекції швидкості руху тіла від часу. Ми доводили це твердження для рівномірного руху. Розглянемо приклад рівноприскореного руху:

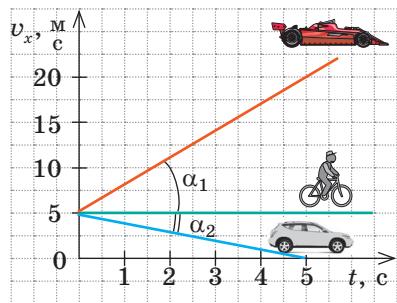
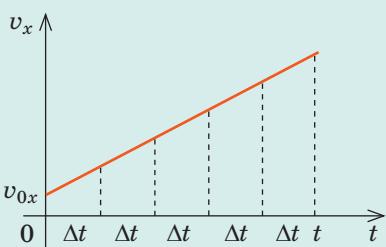
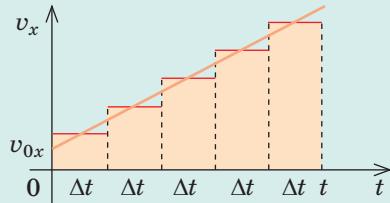


Рис. 6.4. Болід рухається з більшим прискоренням, ніж автомобіль, тому  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Прискорення руху велосипедиста дорівнює нулю

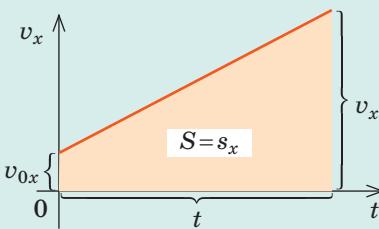
1 Розіб'ємо весь час руху тіла на невеликі інтервали часу  $\Delta t$ .



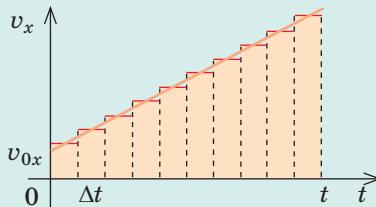
2 Припустимо, що протягом кожного інтервалу часу швидкість руху тіла залишалася незмінною. Загальне переміщення під час такого уявного руху дорівнює сумі площ смужок шириною  $\Delta t$ , які разом утворюють східчасту фігуру.



4 У результаті нескінченного зменшення інтервалів часу ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) східчаста фігура «перетвориться» на трапецію, а переміщення чисельно дорівнюватиме площі цієї трапеції.



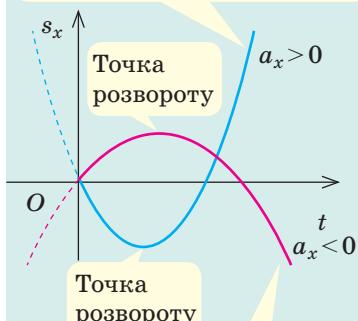
3 Якщо зменшити інтервали часу  $\Delta t$ , то переміщення, як і раніше, дорівнюватиме площі східчастої фігури, яка поступово набуває вигляду трапеції.



Бачимо, що в разі рівноприскореного руху проекція переміщення чисельно дорівнює площі трапеції (формулу для визначення площі трапеції ви знаєте з курсу геометрії):

$$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$$

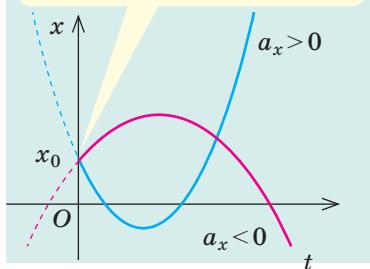
Вітки параболи напрямлені вгору, якщо  $a_x > 0$



Вітки параболи напрямлені вниз, якщо  $a_x < 0$

**Рис. 6.5.** У разі рівноприскореного прямолінійного руху графік залежності  $s_x(t)$  — парабола, яка проходить через початок координат

$x_0$  — початкова координата (координата тіла в момент початку спостереження)



**Рис. 6.6.** У разі рівноприскореного прямолінійного руху графік залежності  $x(t)$  — парабола

### ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО



Узявши до уваги, що  $v_x = v_{0x} + a_x t$ , отримаємо рівняння залежності проекції переміщення від часу для рівноприскореного прямолінійного руху:

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$$

Під час рівноприскореного прямолінійного руху початкова швидкість ( $\vec{v}_0$ ) і прискорення ( $\vec{a}$ ) руху тіла не змінюються, тому залежність проекції переміщення  $s_x$  від часу  $t$  є квадратичною, а графік цієї залежності — парабола (рис. 6.5), вершина якої відповідає точці розвороту (див. ще розв'язання задачі 2 у п. 4).

У багатьох задачах не йдеться про час руху тіла й не потрібно його визначати. У таких випадках для розрахунку невідомих величин використовують формулу:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$$



Отримайте останню формулу самостійно, скориставшись формулою  $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$  і означенням прискорення.

Координату тіла за будь-якого руху визначають за формулою  $x = x_0 + s_x$ , тому для рівноприскореного прямолінійного руху **рівняння координати** має вигляд:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$$

Тобто залежність  $x(t)$ , як і залежність  $s_x(t)$ , є квадратичною, а графік цієї залежності — парабола (рис. 6.6).

### Диспетчер автономного транспорту

конструює, планує і координує рух автономних транспортних засобів, здійснює моніторинг їх руху

Зразд ДТП відбуваються здебільшого через людські похибки. Застосування автономного транспорту (керування яким автоматизоване та здійснюється без водія) може знизити кількість аварій, зменшити затори, зекономити пальне.

Знання фізики допоможе диспетчорові спланувати рух автотранспорту з автопілотами, обрати найкращий комп’ютерний алгоритм, подбати про безпеку руху тощо.

### Алгоритм розв'язування задач із кінематики

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 подайте значення фізичних величин в одиницях СІ.

3. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому позначте вісь координат, напрямки швидкості руху, переміщення, початкової швидкості та прискорення руху тіла.

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 формулі конкретизуйте для задачі.

5. Розв'яжіть задачу в загальному вигляді.

6. Перевірте одиницю, знайдіть значення шуканої величини.

7. Проаналізуйте результат.

8. Запишіть відповідь.

4

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Гальмо легкового автомобіля є справним, якщо на сухому асфальті за швидкості 28 м/с гальмівний шлях автомобіля становить 49 м. Визначте час гальмування та прискорення руху автомобіля.

$$v_0 = 28 \text{ м/с}$$

$$s = 49 \text{ м}$$

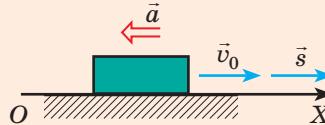
$$v = 0$$

$$t = ?$$

$$a = ?$$

#### Розв'язання

На пояснювальному рисунку спрямуємо вісь  $OX$  у напрямку руху автомобіля. Автомобіль гальмує, тому  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$ .



Оскільки в задачі подано  $v_0$ ,  $v$  і  $s$ , для визначення часу гальмування найзручнішою є формула  $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$  (1), а для визначення прискорення — формула  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$  (2).

Конкретизуємо ці формули (перейдемо від проекцій до модулів):

- напрямок переміщення та напрямок початкової швидкості збігаються з напрямком осі  $OX$ , тому  $v_{0x} = v_0$ ,  $s_x = s$ ;
- кінцева швидкість дорівнює нулю:  $v_x = 0$ ;
- напрямок прискорення протилежний напрямку осі  $OX$ , тому  $a_x = -a$ .

Отже, з формулі (1):  $s = \frac{0 + v_0}{2} t = \frac{v_0}{2} t \Rightarrow t = \frac{2s}{v_0}$ ;

з формулі (2):  $s = \frac{-v_0^2}{-2a} \Rightarrow a = \frac{v_0^2}{2s}$ .

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[t] = \frac{\text{м}}{\text{м/с}} = \text{с}, \quad t = \frac{2 \cdot 49}{28} = 3,5 \text{ (с);}$$

$$[a] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad a = \frac{28^2}{2 \cdot 49} = 8 \text{ (м/с}^2\text{).}$$

*Відповідь:*  $t = 3,5 \text{ с}$ ;  $a = 8 \text{ м/с}^2$ .

**Задача 2.** На рис. 1 подано графік залежності  $v_x(t)$  для руху тіла вздовж осі  $OX$ . 1) Опишіть характер руху тіла. 2) Запишіть рівняння залежності  $s_x(t)$ . 3) Побудуйте графік залежності  $s_x(t)$ .

**Розв'язання**

1) Графік залежності  $v_x(t)$  — відрізок прямої, а тіло весь час рухалося вздовж осі  $OX$ , тому рух тіла є рівноприскореним прямолінійним. Перші 2 с швидкість руху тіла зменшувалася від 20 м/с до 0, потім тіло розвернулося і ще 4 с прискорювало свій рух, рухаючись у протилежному напрямку.

2) Для рівноприскореного прямолінійного руху:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2, \text{де } v_{0x} = 20 \text{ м/с; } a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{0 - 20 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = -10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \text{ Отже, } s_x = 20t - 5t^2.$$

3) Графік залежності  $s_x(t)$  — парабола, вершина якої відповідає точці розвороту. Таким чином, точка  $A$  з координатами  $t = 2$  с,  $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 2 - 5 \cdot 2^2 = 20$  м є вершиною параболи. Ця парабола проходить через точку  $O$  з координатами ( $t = 0$ ,  $s_x = 0$ ) і симетричну їй відносно прямої  $t = 2$  с точку  $B$  з координатами ( $t = 4$  с,  $s_x = 0$ ). Наприкінці спостереження:  $t = 6$  с,  $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 6 - 5 \cdot 6^2 = -60$  м (точка  $C$ ).

За чотирма точками ( $O, A, B, C$ ) можемо побудувати параболу (рис. 2).

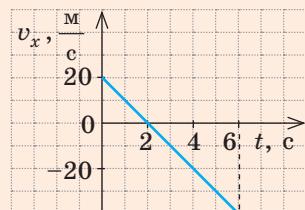


Рис. 1

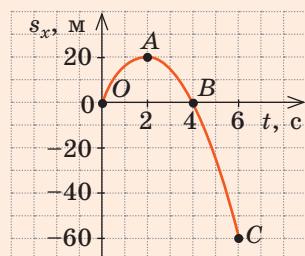


Рис. 2

**Підбиваємо підсумки**

- Рівноприскорений прямолінійний рух — це рух, під час якого тіло рухається прямолінійною траєкторією з незмінним прискоренням.
- Для рівноприскореного прямолінійного руху тіла:
  - прискорення тіла не змінюється з часом, графік проекції прискорення (графік залежності  $a_x(t)$ ) — пряма, паралельна осі часу;
  - швидкість руху змінюється лінійно:  $v_x = v_{0x} + a_x t$ , графік залежності  $v_x(t)$  — відрізок прямої, нахиленої під певним кутом до осі часу;
  - рівняння проекції переміщення має вигляд:  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ ; 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 координат — парабола.

**Контрольні запитання**

1. Який рух називають рівноприскореним прямолінійним? 2. Охарактеризуйте прискорення як фізичну величину. 3. Як рухається тіло, якщо напрямок його прискорення: а) збігається з напрямком руху? б) протилежний напрямку руху? в) якщо прискорення тіла дорівнює нулю? 4. Запишіть рівняння залежності  $v_x(t)$  для рівноприскореного прямолінійного руху. Який вигляд має графік цієї залежності? 5. За допомогою яких формул можна обчислити проекцію переміщення? Виведіть ці формули. 6. Доведіть, що графіком залежності  $s_x(t)$  є парабола. Як напрямлені її вітки? Якому моменту руху відповідає вершина? 7. Запишіть рівняння координати для рівноприскореного прямолінійного руху. Назвіть фізичні величини, які пов'язує це рівняння.

**Вправа № 6**

Рух тіл вважайте рівноприскореним прямолінійним уздовж осі  $OX$ .

1. Рівняння проекції швидкості руху мотоцикла  $v_x = 20 - 4t$  (усі величини задано в одиницях СІ). Визначте:
  - 1) проекцію прискорення та початкову швидкість руху мотоцикла;
  - 2) час, через який мотоцикл зупиниться.
2. Велосипедистка, що рухалася зі швидкістю 2,5 м/с, починає розганятися і, рухаючись із прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ , сягає швидкості 5 м/с.
  - 1) Яким є переміщення велосипедистки за час розгону?
  - 2) Скільки часу розганялася велосипедистка?
  - 3) Запишіть рівняння проекції швидкості руху та проекції переміщення.
  - 4) Якою була швидкість руху велосипедистки через 2 с після початку розгону? Через який інтервал часу швидкість її руху становила 4 м/с?
  - 5) Побудуйте графіки залежності від часу проекції швидкості та проекції переміщення велосипедистки. Покажіть на графіку  $v_x(t)$  переміщення велосипедистки за перші 3 с розгону; за останню 1 с розгону.
  - 6) Через який час після початку розгону велосипедистка подолає відстань 14 м, якщо рухатиметься з незмінним прискоренням?
3. На рис. 1 подано графік залежності  $v_x(t)$  для руху тіла вздовж осі  $OX$ .
  - 1) Опишіть характер руху тіла.
  - 2) Запишіть рівняння залежності  $s_x(t)$ .
  - 3) Побудуйте графік залежності  $s_x(t)$ .
4. Визначте час і координату зустрічі мотоциклістки і пішохода (рис. 2).
5. Складіть задачу за даними, наведними на початку § 6, і розв'яжіть її.

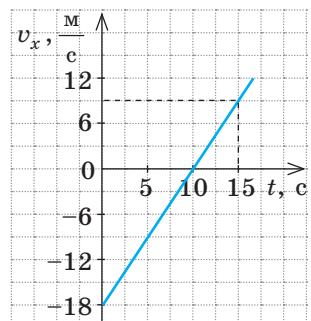


Рис. 1

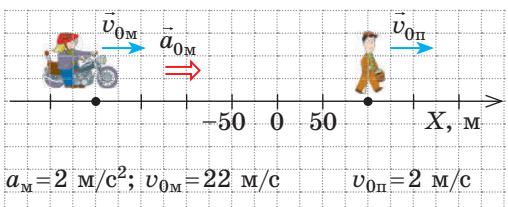


Рис. 2

## § 7. ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ І КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ ПІД ДІЄЮ НЕЗМІННОЇ СИЛИ ТЯЖІННЯ



«Людина — гарматне ядро» — цирковий номер із такою назвою вперше був показаний 1877 р. у Лондоні. 16-річну повітряну гімнастку помістили в дуло «гармати», здійснили постріл, і дівчина, пролетівши над головами захоплених глядачів, опустилася на страхувальну сітку. Сучасні аналогічні «гармати» — це величезні пневматичні пістолети. Як вони працюють, пропонуємо вам дізнатися самостійно, а зараз розглянемо, на які закони спираються творці подібних атракціонів.

Якщо трубку швидко пірнернути, першою впаде на дно сталева кулька, потім — корок, а останнім — пташине перо



Якщо з трубки відкачати повітря, усі три тіла впадуть на дно трубки одночасно

Рис. 7.1. Демонстрація вільного падіння тіл в трубці Ньютона

1. Зі збільшенням висоти  $\bar{g}$  зменшується



3. Рухові тіл заважає опір повітря

Рис. 7.2. Фактори, які ускладнюють описання падіння тіл

## 1 Згадуємо вільне падіння

Аристотель стверджував: чим тіло важче, тим швидше воно падає на Землю. Проте ви знаєте: так буде, якщо рух приблизно однакових за розміром тіл відбуватиметься в повітрі, а от у разі відсутності повітря всі тіла — незалежно від їхньої маси, об'єму, форми — падають на Землю однаково (рис. 7.1).

Падіння тіл у безповітряному просторі, тобто падіння лише під дією сили тяжіння, називають **вільним падінням**.

У разі вільного падіння всі тіла падають на Землю з однаковим прискоренням — *прискоренням вільного падіння* ( $\bar{g}$ ).

- Вектор прискорення вільного падіння завжди напрямлений вертикально вниз.
- Прискорення вільного падіння вперше вимірюв нідерландський математик, астроном і фізик *Крістіан Гюйгенс* (1629–1695) у 1656 р. *Поблизу поверхні Землі*, тобто на невеликій (порівняно з радіусом Землі) відстані, воно є практично незмінним і приблизно дорівнює  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

## 2 Вільне падіння яких тіл розглядатимемо

Характер реального руху тіла в полі тяжіння Землі є досить складним (рис. 7.2), і його описання виходить за межі шкільної програми. Тому приймемо низку *спрощень*.

• Систему відліку, пов'язану з точкою на поверхні Землі, вважатимемо *інерціальною* (про інерціальні системи ви згадаєте в § 9).

• Розглядатимемо рух тіл, що перебувають поблизу поверхні Землі. Тоді кривизною поверхні Землі та зміною прискорення вільного падіння можна знехтувати, а *прискорення вільного падіння вважати незмінним*.

*Розв'язуючи задачі, вважатимемо, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ , якщо не зазначено інше.*

• *Опором повітря будемо нехтувати.* Це спрощення не спричинить серйозного викривлення результатів тільки тоді, коли тіла досить *важкі, невеликі за розмірами, а швидкість їхнього руху досить мала*. Саме такі тіла розглядатимемо далі.



Візьміть книжку, аркуш паперу, гумку, олівець і засуїте, як рух повітря впливає на їх падіння.

**3**

### Як рухається тіло, кинуте вертикально

Спостерігаючи за рухом невеликих важких тіл, які кинуті вертикально вниз чи вертикально вгору або які падають без початкової швидкості, бачимо, що траєкторія їх руху — відрізок прямої. До того ж ці тіла рухаються з незмінним прискоренням.

Рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз, — це рівноприскорений прямолінійний рух із прискоренням, що дорівнює прискоренню вільного падіння:

$$\vec{a} = \vec{g}$$

Згадаємо формули, які описують рівноприскорений прямолінійний рух, врахуємо, що в ході описання руху тіла по вертикальні вектори швидкості, прискорення та переміщення традиційно проектиують на вісь  $OY$ , й отримаємо низку формул, якими описують вільне падіння тіл (див. таблицю).

**Задача 1.** Із гелікоптера, який висить над озером на висоті 45 м, скинули невеликий важкий предмет. 1) Через який інтервал часу предмет упаде в озеро? 2) Якою буде швидкість руху предмета в момент торкання води? 3) Визначте співвідношення переміщень предмета за будь-які рівні інтервали часу  $\Delta t$ .

*Аналіз фізичної проблеми.* Виконаємо пояснівальний рисунок (рис. 1). Спрямуємо вісь  $OY$  вертикально вниз. Початок координат нехай збігається з положенням тіла в момент початку падіння. Швидкість руху тіла в цей момент дорівнює нулю.

Дано:

$$v_0 = 0$$

$$s = h = 45 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$t = ?$

$v = ?$

$s_1 : s_2 : s_3 : \dots = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання

Запишемо рівняння проекції переміщення і проекції швидкості руху тіла:

$$s_y = h_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}; \quad v_y = v_{0y} + g_y t.$$

Конкретизуємо ці рівняння (перейдемо від проекцій до модулів). Із рис. 1 бачимо:

$$s_y = s = h; \quad g_y = g; \quad v_{0y} = 0.$$

Отже, маємо:  $h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad v_y = gt.$

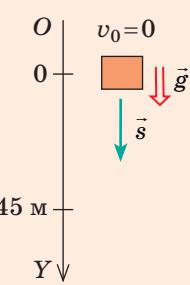


Рис. 1

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[t] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{м/с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 45}{10}} = 3 \text{ (с)}; \quad v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 3 \text{ с} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Для відповіді на запитання 3 скористаємося геометричним змістом переміщення (рис. 2). Вільне падіння тіл є рівноприскореним прямолінійним рухом, тому графік залежності  $v_y(t)$  — це відрізок прямої, який починається в точці ( $t = 0, v_y = 0$ ).

Бачимо, що за перший інтервал часу  $\Delta t$  переміщення тіла чисельно дорівнює площі  $S_0$  одного трикутника (площа фігури під графіком):  $s_1 = 1S_0$ ; за другий інтервал часу  $\Delta t$  — площі трьох трикутників:  $s_2 = 3S_0$ ; за третій інтервал часу  $\Delta t$  — площі п'яти трикутників:  $s_3 = 5S_0$  і т. д.

Відповідь:  $t = 3$  с;  $v = 30$  м/с;  $s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$ .

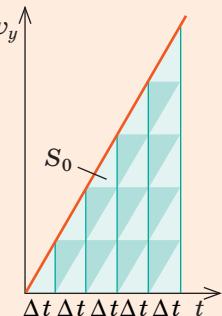


Рис. 2

Під час вільного падіння без початкової швидкості переміщення тіла за рівні послідовні інтервали часу відносяться як непарні числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$$

Ця властивість стосується будь-якого рівноприскореного прямолінійного руху тіла. Наприклад, якщо за першу секунду тіло подолало 5 м, за другу воно подолає  $3 \cdot 5 = 15$  м, за третю —  $5 \cdot 5 = 25$  м, за четверту —  $7 \cdot 5 = 35$  м і т. д.

#### 4

#### Що падає швидше

Уявімо, що з моста в горизонтальному напрямку кинули каштан і в ту саму мить випустили з руки другий каштан. Який каштан упаде у воду швидше? Насправді обидва каштани, якщо їм нічого не завадить, упадуть у воду одночасно.

Отже, рухові тіла у вертикальному напрямку не «заважає» його рух у горизонтальному напрямку, і навпаки. Тут ми зустрілися з проявом принципу незалежності рухів, відповідно до якого будь-який складний рух можна розглядати як «суму» двох (або більше) простих рухів.

Скориставшись спеціальним пристроєм і відеокамерою мобільного телефона, можемо легко підтвердити це (рис. 7.3).

Штовхач надає кульці 2 горизонтальної швидкості. У той самий час кулька 1 звільняється і починає падати вертикально

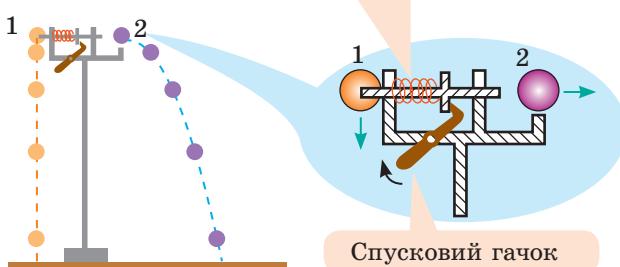


Рис. 7.3. Кулька 1, яка вільно падає без початкової швидкості, і кулька 2, кинута горизонтально, весь час перебувають на однаковій висоті й на Землю падають одночасно

## 5

## Рух тіл, кинутих горизонтально або під кутом до горизонту

Скориставшись принципом незалежності рухів, розглянемо рух тіла, якому поблизу поверхні Землі надано певної не вертикальної швидкості. Нагадаємо, що опір повітря вважатимемо нехтовою малим, тобто рух відбувається лише під дією сили тяжіння з прискоренням  $\vec{g}$ . Такий рух зручно розглядати як результат додавання двох незалежних рухів (рис. 7.4):

1) *горизонтального* — рівномірного уздовж осі  $OX$  (оскільки  $g_x = 0$ ), який описується рівняннями:

$$v_x = v_{0x}; \quad x = x_0 + v_{0x}t;$$

2) *вертикального* — рівноприскореного (з прискоренням  $\vec{g}$ ) уздовж осі  $OY$ , який описується рівняннями:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2}t^2.$$

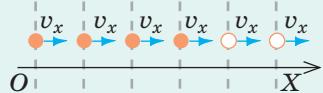
• Модуль і напрямок швидкості руху тіла в довільній точці траєкторії визначаємо, скориставшись теоремою Піфагора та означенням тангенса (див. рис. 7.4):

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

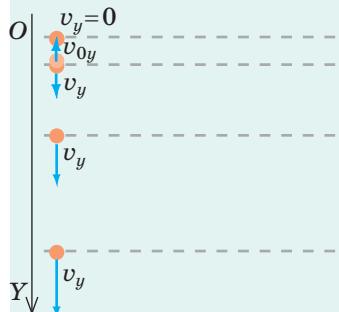
• Якщо з рівняння  $x = x_0 + v_{0x}t$  знайти  $t$  і підставити одержаний вираз у рівняння  $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2}t^2$ , отримаємо рівняння траєкторії руху тіла, яке має вигляд квадратичної функції:  $y(x) = Ax^2 + Bx + C$ .

Таким чином, траєкторія руху тіла, якому поблизу поверхні Землі надано початкової швидкості, є параболічною (рис. 7.5).

*Горизонтальний рух* — швидкість руху не змінюється



*Вертикальний рух* — рівноприскорений рух із прискоренням  $\vec{g}$



*Складний рух*

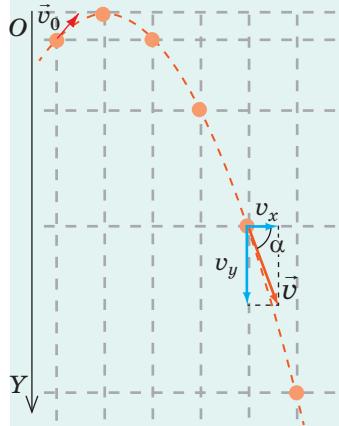


Рис. 7.4. Додавання вертикального і горизонтального рухів тіла. Положення тіла подано через рівні інтервали часу

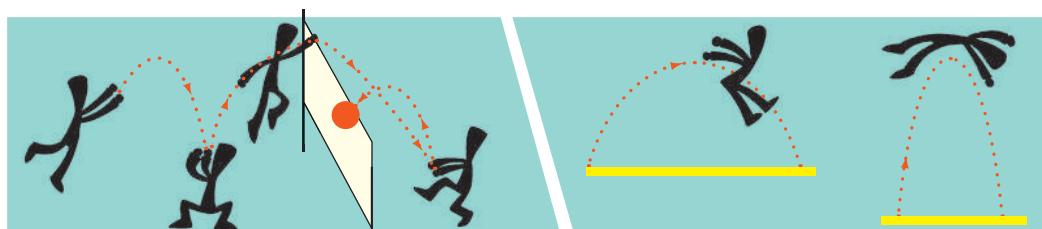


Рис. 7.5. Траєкторія руху тіла, якому надано швидкість, що напрямлена горизонтально або під кутом до горизонту, є параболічною, а її кривизна залежить від модуля і напрямку цієї швидкості

## 6

## Рух тіла, кинутого горизонтально

**Задача 2.** Мотоцикліст, що рухався горизонтально гірською дорогою зі швидкістю 15 м/с, не загальмував перед поворотом, і його мотоцикл упав з висоти 20 м у сніговий замет. 1) Скільки часу падав мотоцикл? 2) Якою є горизонтальна дальність польоту мотоцикла? Як, на вашу думку, зміниться ця дальність у реальній ситуації? Опором повітря знехтувати.

Дано:

$$v_0 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 20 \text{ м}$$

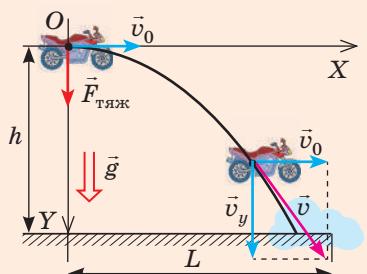
$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$t = ?$$

$$L = ?$$

## Розв'язання

Оберемо систему відліку: пов'яжемо початок координат із місцем, де мотоцикл почав падіння, вісь  $OY$  спрямуємо вертикально вниз, вісь  $OX$  — у напрямку початкової швидкості руху мотоцикла (див. [рисунок](#)).



В обраній системі відліку:

$$\text{рух уздовж осі } OX \text{ — рівномірний: } v_x = v_{0x} ; x = x_0 + v_{0x}t \quad (1)$$

$$\text{рух уздовж осі } OY \text{ — рівноприскорений: } v_y = v_{0y} + g_y t ; y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}. \quad (2)$$

Конкретизуємо отримані результати (див. [рисунок](#)):

$$v_{0x} = v_0 ; x_0 = 0 ; x = L$$

$$v_{0y} = 0 ; y_0 = 0 ; y = h.$$

Отже, рівняння (1) і (2) набувають вигляду:

$$v_x = v_0 ; L = v_0 t$$

$$v_y = gt ; h = \frac{gt^2}{2}$$

*Зверніть увагу!* Виділені формули справедливі для описання руху будь-якого горизонтально кинутого тіла.

$$1) \text{ Визначимо час падіння мотоцикла: } h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} ; t = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \text{ м}}{10 \text{ м/с}}} = 2 \text{ с.}$$

$$2) \text{ Обчислимо дальність польоту: } L = v_0 t ; L = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2 \text{ с} = 30 \text{ м.}$$

*Проаналізуємо результат.* Очевидно, що в реальній ситуації дальність польоту буде меншою, адже рухові заважає опір повітря. Проте зрозуміло, що не означає, що падіння буде безпечнішим. *Будьте обережними й пильними на дорогах!*

*Відповідь:*  $t = 2 \text{ с} ; L = 30 \text{ м.}$



**Рис. 7.6.** За напрямком і дальністю польоту м'яча ви можете визначити, якої швидкості ви надали м'ячу під час удару або кидка

## 7

## Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

Прочитавши про рекорди швидкості польоту спортивних снарядів, учениця вирішила з'ясувати, якої швидкості вона надає футбольному м'ячу. Для цього дівчинка вдарила по м'ячу, спрямувавши його під кутом  $45^\circ$  до горизонту (див. [рис. 7.6](#)). М'яч упав на землю на відстані 40 м від учениці. Виконавши розрахунки, дівчинка вирішила, що вона надала м'ячу швидкості 20 м/с, а м'яч піднявся на висоту 8 м. Чи не помилилася учениця?

Ознайомтеся з розв'язанням аналогічної задачі в загальному вигляді (див. нижче). Скориставшись отриманими формулами, оцініть розрахунки дівчинки, а після уроків проведіть подібний експеримент та оцініть швидкість, якої ви надаєте м'ячу.

**Задача 3.** Футболістка вдарила по м'ячу, надавши йому швидкості  $v_0$ , напрямленої під кутом  $\alpha$  до горизонту. Визначте дальність польоту та найбільшу висоту підйому м'яча.

Дано:

$v_0$

$\alpha$

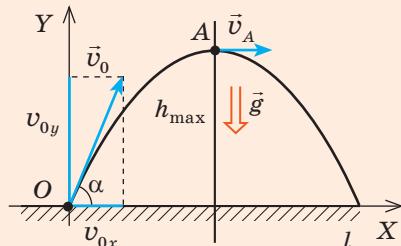
$g$

$L = ?$

$h_{\max} = ?$

Розв'язання

Виконаємо пояснювальний рисунок (рис. 1):  
початок координат пов'яжемо з точкою на поверхні Землі, де м'яч відірвався від бутси футболістки; вісь  $OY$  спрямуємо вертикально вгору; вісь  $OX$  — горизонтально.



В обраній системі відліку:

Рис. 1

рух уздовж осі  $OX$  — рівномірний:

$$v_x = v_{0x}, \quad x = x_0 + v_{0x}t, \quad (1)$$

де  $x_0 = 0$ ,  $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$

рух уздовж осі  $OY$  — рівноприскорений:

$$v_y = v_{0y} + g_y t, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad (2)$$

де  $y_0 = 0$ ,  $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ ,  $g_y = -g$ ,

тому рівняння (1) і (2) набувають вигляду:

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad x = v_0 \cos \alpha \cdot t \quad \left| \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2} \right.$$

Час  $t_1$  руху м'яча до верхньої точки траекторії (точки A) знайдемо з умови  $v_y(t_1) = 0$ :

$$v_0 \sin \alpha - gt_1 = 0 \Rightarrow t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Координата  $y$  м'яча в точці A — це максимальна висота підйому м'яча:

$$h_{\max} = y_A = v_0 \sin \alpha \cdot t_1 - \frac{gt_1^2}{2}.$$

Після підстановки  $t_1$  отримуємо формули для визначення максимальної висоти

підйому та загального часу руху м'яча:  $h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$ ;  $t = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ .

Дальність  $L$  польоту дорівнює координаті  $x$  тіла наприкінці руху ( $x = L$ ):

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t = v_0 \cos \alpha \cdot \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \text{ Оскільки } 2\cos \alpha \cdot \sin \alpha = \sin 2\alpha, \text{ то } L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

*Зверніть увагу!* З останньої формулі випливає:

- якщо кинути тіло під кутом  $\alpha$ , а потім під кутом  $90^\circ - \alpha$ , то дальність польоту не зміниться, тобто тіло потрапить у ту саму точку, рухаючись різними траекторіями (рис. 2);
- максимальної дальності польоту тіло сягає, якщо  $\alpha = 45^\circ$  ( $\sin 2\alpha = 1$ ).

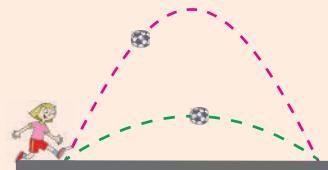


Рис. 2



## Підбиваємо підсумки

- Падіння тіл у безповітряному просторі, тобто падіння лише під дією сили тяжіння, називають вільним падінням.
- У разі вільного падіння всі тіла падають на Землю з однаковим прискоренням — прискоренням вільного падіння ( $\vec{g}$ ). Вектор прискорення вільного падіння завжди напрямлений вертикально вниз; за модулем  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  ( $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ ).
- Рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз, — це рівноприскорений прямолінійний рух із прискоренням, що дорівнює прискоренню вільного падіння:  $\vec{a} = \vec{g}$ .
- Траєкторія руху тіла, кинутого горизонтально або під кутом до горизонту, — параболічна. Такі рухи розглядають як результат додавання двох простих рухів: горизонтального — рівномірного уздовж осі  $OX$  і вертикального — рівноприскореного (з прискоренням  $\vec{g}$ ) уздовж осі  $OY$ . При цьому рівняння залежностей проекції швидкості та координат від часу мають вигляд:

$$v_x = v_{0x}, \quad x = x_0 + v_{0x}t; \quad v_y = v_{0y} + g_y t, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{\frac{g_y t^2}{2}}{2}.$$



## Контрольні запитання

1. Який рух називають вільним падінням тіл? Яким є характер цього руху?
2. Як напрямлене прискорення вільного падіння та чому воно дорівнює?
3. Запишіть у загальному вигляді рівняння руху тіла під дією сили тяжіння.
4. Який вигляд матимуть рівняння руху, якщо тіло кинуто вертикально? горизонтально? під кутом до горизонту? 5. Якою є траєкторія руху тіла, кинутого вертикально? горизонтально? під кутом до горизонту? Наведіть приклади. 6. Як визначити модуль і напрямок швидкості руху тіла в будь-якій точці траєкторії?



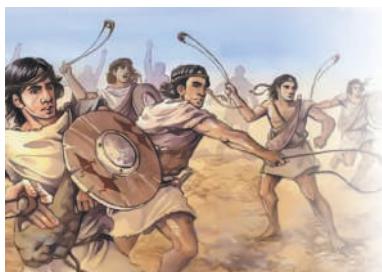
## Вправа № 7

*Опором повітря нехтуйте. Вважайте, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .*

1. Металеву кульку підняли на висоту 1,8 м над підлогою і відпустили. На якій висоті прискорення вільного падіння кульки буде найбільшим: а) на висоті 1,8 м; б) на висоті 1 м; в) у момент удару об підлогу? На якій висоті із зазначених буде найбільшою швидкість руху кульки? Визначте цю швидкість.
2. Стрілу випустили з лука вертикально вгору зі швидкістю 10 м/с. Відомо, що через 2 с вона вже падала вниз із тією самою швидкістю. Визначте мак-симальну висоту польоту, шлях і переміщення стріли протягом цих 2 с.
3. Струмінь води, напрямлений під кутом  $60^\circ$  до горизонту, сягнув висоти 15 м.
  - 1) Знайдіть: а) швидкість витікання води; б) час польоту частинок струменя; в) дальність польоту частинок струменя.
  - 2) Якою буде дальність струменя, якщо спрямувати його під кутом  $30^\circ$  до горизонту?
  - 3) Чому струмінь води розширяється?
4. Із гелікоптера, який перебував на висоті 45 м і рухався зі швидкістю 10 м/с, упав невеликий важкий предмет. Через який інтервал часу предмет упаде на землю? Якою буде швидкість руху предмета в цей момент? Розв'яжіть задачу для випадків, коли гелікоптер: 1) піднімається; 2) опускається; 3) рухається горизонтально.



## § 8. РІВНОМІРНИЙ РУХ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПО КОЛУ



У давнину воїни користувалися пращею — простою, але дуже цікавою за принципом дії зброєю для метання каменів, ядер тощо: у мотузок (або смугу шкіри) вкладали «снаряд», розкручували мотузок по коловій траєкторії і в певний момент часу відпускали один кінець — «снаряд» прямував до цілі. А чому випущений із пращи камінь не продовжує рухатися по колу, а походить так, ніби його кинули в певному напрямку з дуже великою швидкістю? Про це та про інші особливості руху по колу ви дізнаєтесь із цього параграфа.

**1**

### Якими є особливості криволінійного руху

Рух по колу — це *криволінійний рух*, а будь-який криволінійний рух набагато складніший за прямолінійний.

- По-перше, у разі криволінійного руху змінюються щонайменше дві координати тіла.
- По-друге, безперервно змінюється напрямок вектора миттєвої швидкості: цей вектор завжди збігається з дотичною до траєкторії руху тіла в точці, що розглядається, й напрямлений у бік руху тіла (рис. 8.1, 8.2).
- По-третє, криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням: навіть якщо модуль швидкості залишається незмінним, напрямок швидкості безперервно змінюється.



Якою може бути траєкторія руху каменя, який воїн випускає з пращи? У який момент воїн має відпустити кінець мотузки, щоб камінь полетів якнайдалі?

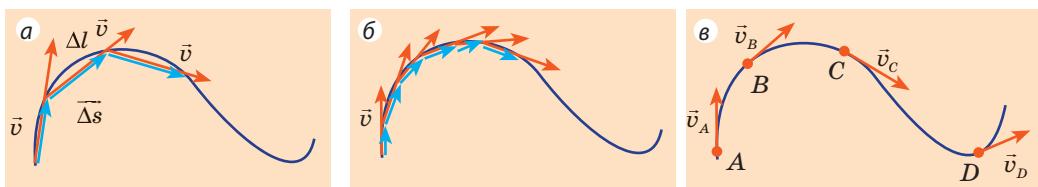
**2**

### Що таке лінійна швидкість

Скалярну фізичну величину, яка характеризує криволінійний рух і дорівнює середній шляховій швидкості, виміряній за нескінченно малий інтервал часу, називають **лінійною швидкістю руху тіла**:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \text{ якщо } \Delta t \rightarrow 0$$

Оскільки для дуже малих інтервалів часу модуль переміщення ( $\Delta s$ ) наближається до довжини ділянки траєкторії ( $\Delta l$ ) (див. рис. 8.1), **лінійна швидкість у даній точці дорівнює модулю миттєвої швидкості**.



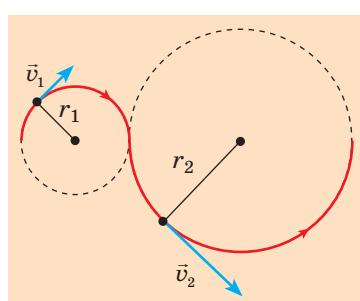
**Рис. 8.1.** Розбиваючи траєкторію руху тіла на дедалі менші ділянки  $\Delta l$ , бачимо, що вектор швидкості все більше наближається до дотичної (а, б). У даній точці миттєва швидкість напрямлена вздовж дотичної до траєкторії руху тіла (в)



**Рис. 8.2.** Швидкості руху іскорок феєрверка, бризок з-під коліс автомобіля, металевих ошурок напрямлені по дотичній до кола. Саме в цьому напрямку частинки продовжують свій рух після відриву

Саме лінійну швидкість мають на увазі, коли, наприклад, характеризують рух автомобіля на повороті, коли описують рух частинки в прискорювачі, коли йдеться про швидкість польоту штучних супутників Землі тощо.

Із часом лінійна швидкість може залишатися незмінною, а може змінюватися. Залежно від цього у фізиці розглядають *рівномірний криволінійний рух* (рух із незмінною лінійною швидкістю) і *нерівномірний криволінійний рух* (рух зі змінною лінійною швидкістю).



**Рис. 8.3.** У кожній точці колової траєкторії швидкість руху напрямлена уздовж дотичної до кола, тобто перпендикулярно до радіуса кола

У разі рівномірного криволінійного руху за будь-які рівні інтервали часу тіло долає одинаковий шлях, тому лінійну швидкість руху тіла можна визначити за формулою:

$$v = \frac{l}{t} ,$$

де  $l$  — шлях, пройдений тілом;  $t$  — час руху.

Описувати криволінійний рух досить складно, адже різних форм криволінійних траєкторій — безліч. Однак практично будь-яку складну криволінійну траєкторію можна подати як сукупність дуг різних радіусів, а криволінійний рух розглядати як рух по колу (рис. 8.3). Розглянемо найпростіший вид криволінійного руху — *рівномірний рух по колу*.

### 3

### Які фізичні величини характеризують рівномірний рух по колу

**Рівномірний рух тіла по колу** — це такий криволінійний рух, за якого траєкторією руху тіла є коло, а лінійна швидкість руху не змінюється з часом.

Із курсу фізики 7 класу ви знаєте, що рівномірний рух по колу досить часто є періодичним рухом, а отже, характеризується такими фізичними величинами, як *період* і *частота*.

**Період обертання  $T$**  — фізична величина, що дорівнює інтервалу часу, за який тіло здійснює один оберт:  $T = \frac{t}{N}$  ( $N$  — кількість обертів, здійснених тілом за інтервал часу  $t$ ). Одиниця періоду обертання в СІ — секунда:  $[T] = 1$  с.

**Обертова частота**  $n$  — фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості обертів за одиницю часу:  $n = \frac{N}{t}$ . *Одиниця обертової частоти в СІ — оберт за секунду:  $[n] = 1 \frac{\text{об}}{\text{с}} = \text{с}^{-1} \left( \frac{r}{s}, \text{s}^{-1} \right)$ .*

Період і обертова частота є *взаємно оберненими величинами*:  $T = \frac{1}{n}$ .

За періодом обертання та радіусом колової траєкторії легко визначити **лінійну швидкість**  $v$  рівномірного руху тіла по колу. Дійсно, за час одного оберту ( $t = T$ ) тіло долає відстань, що дорівнює довжині кола:  $l = 2\pi r$ . Оскільки  $v = l/t$ , маємо:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (1)$$

Для характеристики руху тіла по колу окрім лінійної швидкості часто використовують **кутову швидкість**.

**Кутова швидкість** — це фізична величина, яка чисельно дорівнює куту повороту радіуса за одиницю часу:

$$\omega = \frac{\varphi}{t},$$

де  $\omega$  — кутова швидкість;  $\varphi$  — кут повороту радіуса за інтервал часу  $t$  (рис. 8.4).

*Одиниця кутової швидкості в СІ — радіан за секунду:  $[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \text{с}^{-1} \left( \frac{\text{рад}}{\text{s}}, \text{s}^{-1} \right)$ .*

За час, що дорівнює одному періоду ( $t = T$ ), радіус виконує один оберт ( $\varphi = 2\pi$ ), тому кутову швидкість можна обчислити за формулою:

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

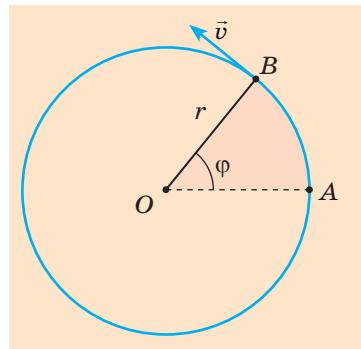
Із формул (1) і (2) випливає, що кутова і лінійна швидкості пов'язані співвідношенням:

$$v = \omega r$$

#### 4 Чому в разі рівномірного руху тіла по колу прискорення називають доцентровим

Нагадаємо, що будь-який криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням, оскільки напрямок миттєвої швидкості безперервно змінюється.

Визначимо напрямок прискорення під час рівномірного руху тіла по колу. За означенням  $\ddot{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , тому напрямки векторів прискорення та зміни швидкості збігаються ( $\ddot{a} \uparrow \Delta \vec{v}$ ). Отже, визначимо напрямок вектора зміни швидкості  $\Delta \vec{v}$  (рис. 8.5, a). Бачимо, що вектор  $\Delta \vec{v}$  напрямлений усередину кола; вектор прискорення  $\ddot{a}$  теж напрямлений усередину кола. Доведемо,



**Рис. 8.4.** Рівномірний рух тіла по колу:  $r$  — радіус кола;  $\vec{v}$  — вектор миттєвої швидкості в точці  $B$ ;  $\varphi$  — кут повороту радіуса

Перенесемо вектор  $\vec{v}$  паралельно самому собі так, щоб він виходив із точки  $A$ , і знайдемо різницю векторів  $(\vec{v} - \vec{v}_0)$  — вектор зміни швидкості  $(\Delta \vec{v})$

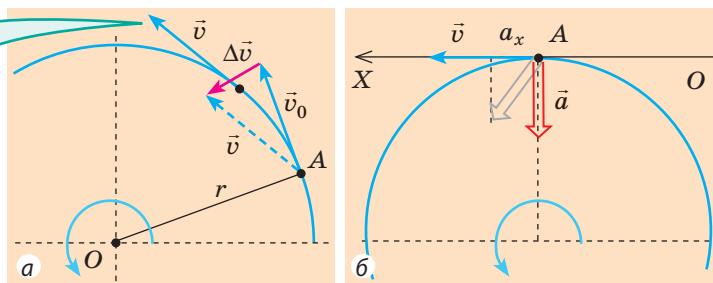


Рис. 8.5. Визначення напрямку прискорення рівномірного руху тіла по колу

що вектор  $\vec{a}$  напрямлений безпосередньо до центра кола, тобто вздовж радіуса. Оскільки миттєва швидкість  $\vec{v}$  руху тіла напрямлена по дотичній, а дотична перпендикулярна до радіуса  $r$ , потрібно довести, що  $\vec{a} \perp \vec{v}$ .

Доведення здійснимо методом від супротивного. Припустимо, що вектор прискорення  $\vec{a}$  не є перпендикулярним до вектора миттєвої швидкості  $\vec{v}$  (сіра стрілка на рис. 8.5, б). Однак у такому випадку швидкість руху тіла буде збільшуватися, якщо  $a_x > 0$ , і зменшуватися, якщо  $a_x < 0$ , — отже, йдеться про нерівномірний рух, тоді як ми розглядаємо рівномірний рух. Таким чином, наше припущення було хибним. Отже,  $\vec{a} \perp \vec{v}$ .

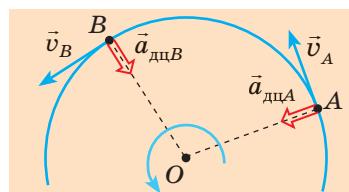


Рис. 8.6. У випадку рівномірного руху по колу прискорення руху тіла в даній точці завжди напрямлене до центра кола (є перпендикулярним до миттєвої швидкості)

У разі рівномірного руху тіла по колу:

- вектор прискорення напрямлений до центра кола — саме тому прискорення рівномірного руху тіла по колу називають доцентровим прискоренням  $\vec{a}_{\text{дц}}$  (рис. 8.6);
- модуль доцентрового прискорення обчислюють за формулами:

$$a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r} \quad ; \quad a_{\text{дц}} = \omega^2 r ,$$

де  $v$  — лінійна швидкість;  $r$  — радіус кола;  $\omega$  — кутова швидкість.



### Підбиваємо підсумки

- У разі криволінійного руху вектор миттєвої швидкості збігається з дотичною до траєкторії руху тіла, напрямок миттєвої швидкості безперервно змінюється, тому криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням. Криволінійний рух, під час якого траєкторією руху тіла є коло, а лінійна швидкість не змінюється з часом, називають рівномірним рухом по колу.
- У разі рівномірного руху тіла по колу:
  - миттєва швидкість перпендикулярна до радіуса кола, за модулем дорівнює лінійній швидкості та обчислюється за формулами:  $v = \frac{l}{t}$ ;  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , де  $T$  — період обертання;  $r$  — радіус кола;

\* Спробуйте отримати цю формулу самостійно або скористайтеся додатковими джерелами інформації.

— кутова швидкість  $\omega$  чисельно дорівнює куту  $\phi$  повороту радіуса за одиницю часу  $t$ , обчислюється за формулами  $\omega = \frac{\phi}{t}$ ;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  і пов'язана з лінійною швидкістю  $v$  співвідношенням  $v = \omega r$ ;

— прискорення є доцентровим ( $\bar{a}_{\text{дц}}$ ), тобто напрямлене до центра кола; його модуль обчислюють за формулами:  $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}$ ;  $a_{\text{дц}} = \omega^2 r$ .



### Контрольні запитання

- Чи може тіло рухатися криволінійною траєкторією без прискорення? Доведіть ваше твердження.
- Як у разі криволінійного руху напрямлений вектор миттєвої швидкості?
- Які фізичні величини описують рівномірний рух тіла по колу? Дайте їм характеристики.
- Яким співвідношенням пов'язані кутова і лінійна швидкості руху? Виведіть це співвідношення.
- Доведіть, що в разі рівномірного руху по колу прискорення напрямлене до центра цього кола.
- За якими формулами визначають доцентрове прискорення?



### Вправа № 8

- Для чого поверх коліс велосипеда надівають щитки?
- На рис. 1 показано траєкторію автомобіля, який рухається з незмінною швидкістю. У якій із зазначених точок траєкторії доцентрове прискорення автомобіля найбільше? найменше?

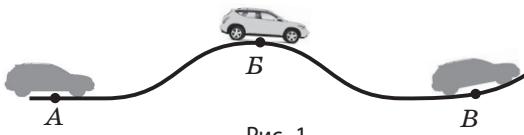


Рис. 1

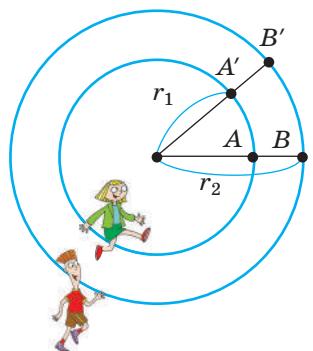


Рис. 2

- Автомобіль рухається зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту з радіусом кривизни 30 м. Чому дорівнює і куди напрямлене прискорення руху автомобіля?
- Хлопчик і дівчинка рівномірно рухаються по колах різного радіуса:  $r_2 = 1,5r_1$  (рис. 2). У скільки разів швидкість руху хлопчика повинна бути більшою за швидкість руху дівчинки, щоб вони весь час перебували на одному радіусі? У скільки разів будуть відрізнятися прискорення їхніх рухів?
- Точка на ободі колеса велосипеда рухається з прискоренням  $100 \text{ м/с}^2$ , радіус колеса — 0,4 м. З якою швидкістю рухається велосипед? Скільки обертів за хвилину здійснює колесо? Вважайте, що  $\pi^2 = 10$ .
- Хвилинна стрілка годинника втричі довша за секундну. У скільки разів більше прискорення руху кінця секундної стрілки?
- З якою швидкістю має летіти літак над екватором Землі, щоб для людей у літаку Сонце не змінювало свого положення на небосхилі?



### Експериментальне завдання

Визначте доцентрове прискорення, лінійну та кутову швидкості руху точки на диску мікрохвильової печі (іграшкового автомобіля, міксерса тощо). Які вимірювання вам необхідно здійснити, щоб виконати це завдання?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

**Тема.** Визначення прискорення тіла в ході рівноприскореного прямолінійного руху.

**Мета:** визначити прискорення руху кульки, яка скочується похилим жолобом.

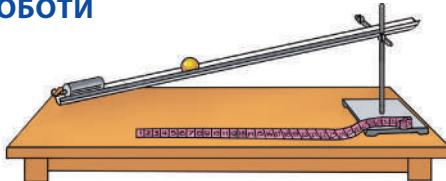
**Обладнання:** металевий або дерев'яний жолоб, кулька, штатив із муфтою та лапкою, секундомір, вимірювальна стрічка, металевий циліндр або інший предмет для припинення руху кульки по жолобу.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ



#### Підготовка до експерименту

- Закріпіть жолоб у лапці штатива. Опустіть лапку, розташувавши жолоб під невеликим кутом до горизонту (див. [рисунок](#)).
- У нижній частині жолоба розташуйте металевий циліндр.
- У верхній частині жолоба зробіть позначку.



#### Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

- Виміряйте відстань  $s$  від позначки до циліндра (ця відстань дорівнює модулю переміщення кульки вздовж жолоба).
- Розташуйте кульку навпроти позначки та виміряйте час  $t_1$ , за який скочується кулька (до моменту її удару об металевий циліндр).
- Повторіть дослід ще тричі.



#### Опрацювання результатів експерименту

- Обчисліть середній час руху кульки:  $t_{\text{cep}} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) / 4$ .
- Обчисліть середнє значення прискорення кульки:  $a_{\text{cep}} = 2s / t_{\text{cep}}^2$ .
- Обчисліть абсолютну та відносну похибки вимірювання (див. п. 4, 5 § 2):
  - часу:  $\Delta t_{\text{cep}} = \frac{|t_1 - t_{\text{cep}}| + |t_2 - t_{\text{cep}}| + |t_3 - t_{\text{cep}}| + |t_4 - t_{\text{cep}}|}{4}$ ;  $\varepsilon_t = \Delta t_{\text{cep}} / t_{\text{cep}}$ ;
  - модуля переміщення:  $\Delta s = \Delta s_{\text{прил}} + \Delta s_{\text{вип}}$ ;  $\varepsilon_s = \Delta s / s$ ;
  - модуля прискорення:  $\varepsilon_a = \varepsilon_s + 2\varepsilon_t$ ;  $\Delta a = \varepsilon_a \cdot a_{\text{cep}}$ .
- Округліть результати та запишіть результат вимірювання прискорення.

Номер досліду	Переміщення кульки $s$ , м	Час руху кульки		Прискорення кульки $a_{\text{cep}}$ , м/с <sup>2</sup>	Похибка вимірювання прискорення		Результат вимірювання прискорення $a = a_{\text{cep}} \pm \Delta a$ , м/с <sup>2</sup>
		$t_i$ , с	$t_{\text{cep}}$ , с		відносна $\varepsilon_a$ , %	абсолютна $\Delta a$ , м/с <sup>2</sup>	



#### Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент та його результати. Зробіть висновок, у якому зазначте: 1) величину, яку ви вимірювали; 2) результат вимірювання; 3) причини похибки; 4) вимірювання якої величини дає найбільшу похибку.



#### Творче завдання

Подумайте, від яких чинників залежить прискорення, з яким тіло скочується похилою площиною. Запишіть план проведення відповідного експерименту, проведіть його та зробіть висновок щодо правильності вашого припущення.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

**Тема.** Вивчення руху тіла по колу.

**Мета:** визначити характеристики рівномірного руху кульки по колу: період обертання, обертову частоту, лінійну швидкість, доцентрове прискорення й модуль рівнодійної сил, які надають кульці цього прискорення.

**Обладнання:** штатив із муфтою та стрижнем, нитка завдовжки 50–60 см, аркуш паперу, циркуль, терези з важками, секундомір, металева кулька, лінійка, динамометр.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

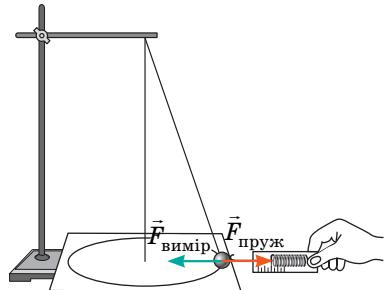
#### Підготовка до експерименту

Накресліть на ватмані концентричні кола радіусами 15 і 20 см.

#### Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Виміряйте масу кульки.
2. Зберіть установку (див. рисунок).
3. Розкрутіть маятник так, щоб траєкторія руху кульки якомога точніше повторювала одне з кіл, зображених на ватмані. Виміряйте інтервал часу  $t$ , за який кулька здійснить 5 обертів.
4. Виміряйте модуль рівнодійної  $\vec{F}_{\text{вимір}}$ , зрівноваживши її силою  $\vec{F}_{\text{пруж}}$  пружності пружини динамометра (див. рисунок).
5. Проведіть аналогічний дослід для іншого кола.



#### Опрацювання результатів експерименту

1. Визначте період обертання  $T$ , обертову частоту  $n$ , лінійну швидкість  $v$  руху кульки:  $T = \frac{t}{N}$ ;  $n = \frac{N}{t}$ ;  $v = \frac{2\pi R}{T}$ .
2. Визначте модуль доцентрового прискорення кульки:  $a_{\text{доц}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ .
3. Визначте модуль рівнодійної  $\vec{F}$  сил, які надають кульці, що рухається, доцентрового прискорення:  $F = ma_{\text{доц}}$ .
4. Порівняйте вимірюне і обчислене значення рівнодійної сил, визначте відносну похибку експериментальної перевірки рівності  $F = F_{\text{вим}}$  (див. п. 5 § 2).

Маса кульки $m$ , кг	Радіус кола $R$ , м	Час руху $t$ , с	Кількість обертів $N$	Рівнодійна $F_{\text{вимір}}$ , Н	Період обертання $T$ , с	Обертова частота $n$ , $\text{с}^{-1}$	Лінійна швидкість $v$ , м/с	Доцентрове прискорення $a_{\text{доц}}$ , $\text{м/с}^2$	Рівнодійна $F$ , Н

#### Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому зазначте: 1) фізичні величини, які ви визначали; 2) точність проведеного експерименту та причини похибки.

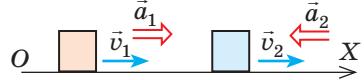
# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «МЕХАНІКА».

## Частина 1. Кінематика

1. Ви згадали про механічний рух та основні фізичні величини, які характеризують рівномірний прямолінійний і рівноприскорений прямолінійний рухи.

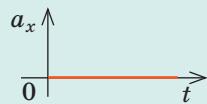
### ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

Швидкість і прискорення напрямлені вздовж траєкторії руху тіла.



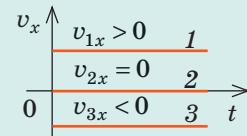
#### рівномірний

Прискорення руху тіла:  $a=0$



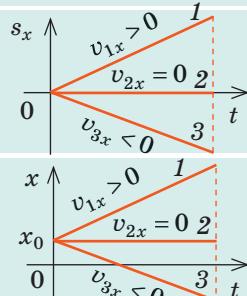
Проекція швидкості руху тіла:

$$v_x = \frac{s_x}{t}$$



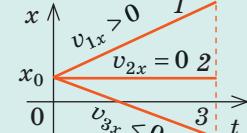
Проекція переміщення тіла:

$$s_x = v_x t$$



Координата тіла:

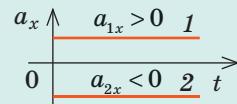
$$x = x_0 + v_x t$$



#### рівноприскорений

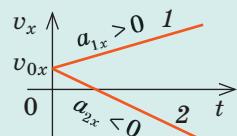
Проекція прискорення руху тіла:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$



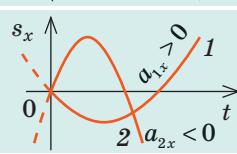
Проекція швидкості руху тіла:

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$



Проекція переміщення тіла:

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$



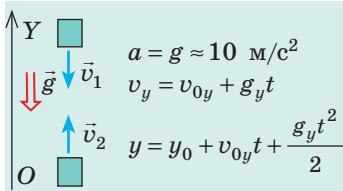
Координата тіла:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

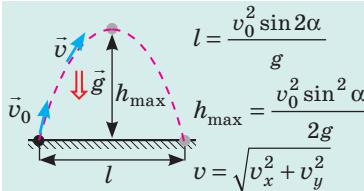
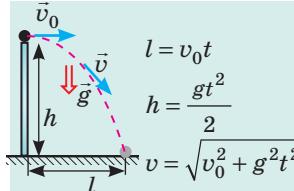


2. Ви поглибили свої знання про рух тіла під дією сили тяжіння.

#### Рух тіла, кинутого вертикально



#### Рух тіла, кинутого горизонтально або під кутом α до горизонту



3. Ви вивчили рівномірний рух тіла по колу.

#### Рівномірний рух по колу

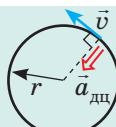
Період обертання:  $T = t/N$ ;  $[T] = 1$  с (секунда)

Кутова швидкість:  $\omega = 2\pi/T$ ;  $[\omega] = 1$  рад/с ( $\text{с}^{-1}$ )

Лінійна швидкість:  $v = 2\pi r/T = \omega r$ ;  $[v] = 1$  м/с

Доцентрове прискорення:  $a_{\text{дц}} = v^2/r = \omega^2 r$ ;  $[a_{\text{дц}}] = 1$  м/ $\text{с}^2$

Прискорення  $\vec{a}_{\text{дц}}$  направлене до центра кола; швидкість  $\vec{v}$  — по дотичній до кола



# ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I

## «МЕХАНІКА». Частина 1. Кінематика

Завдання 1–4 містять тільки одну правильну відповідь.

- (1 бал) Ученицу можна вважати матеріальною точкою, коли вимірюють: а) її зрост; б) масу; в) тиск, який вона створює на підлогу; г) відстань, яку вона долає.
- (1 бал) Тіло, кинуте під кутом до горизонту, рухається лише під дією сили тяжіння. Прискорення руху тіла:
  - найбільше в момент початку руху; б) однакове в будь-який момент руху;
  - найменше в найвищій точці траєкторії; г) збільшується під час підйому.
- (1 бал) Автомобіль рухається прямолінійною трасою. Яка ділянка графіка (рис. 1) відповідає руху з найбільшим за модулем прискоренням, якщо вісь  $OX$  напрямлена вздовж траси?
  - $AB$ ; б)  $BC$ ; в)  $CD$ ; г)  $DE$ .
- (2 бали) Малюк катається на каруселі, рухаючись колом радіуса 5 м. Якими будуть шлях  $l$  і модуль переміщення  $s$  малюка, коли диск каруселі виконає один повний оберт?
  - $l=0$ ,  $s=0$ ; б)  $l=31,4$  м,  $s=0$ ; в)  $l=0$ ,  $s=5$  м; г)  $l=31,4$  м,  $s=5$  м.
- (2 бали) Пасажирський потяг завдовжки 280 м рухається зі швидкістю 72 км/год. По сусідній колії в тому самому напрямку рухається зі швидкістю 36 км/год товарний потяг завдовжки 700 м. Протягом якого інтервалу часу пасажирський потяг пройде вздовж товарного потяга?
- (3 бали) За графіком проекції швидкості руху автомобіля (див. рис. 1) визначте переміщення та середню шляхову швидкість руху автомобіля за перші 5 с спостереження.
- (3 бали) Рух тіла задано рівнянням  $x = 0,5 + 5t - 2t^2$  (м). Визначте переміщення тіла за перші 2 с руху; швидкість руху тіла через 3 с. Вважайте, що в обраній системі відліку тіло рухалося вздовж осі  $OX$ .
- (3 бали) Із точки  $A$ , розташованої на висоті 2,75 м над поверхнею землі, вертикально вгору кинули м'яч зі швидкістю 5 м/с. Коли м'яч досяг найвищої точки свого підйому, із точки  $A$  з тією самою швидкістю кинули вгору другий м'яч. Визначте висоту, на якій зіткнуться м'ячі.
- (4 бали) Каскадер перестрибує з одного даху на інший (дахи розташовані на одній висоті). Якою має бути найменша швидкість руху каскадера, якщо відстань між дахами становить 4,9 м? Якої найбільшої висоти сягне при цьому каскадер?
- (4 бали) Тіло рухається вздовж осі  $OX$  із початковою швидкістю 4 м/с. Скориставшись графіком  $x(t)$  (рис. 2): 1) запишіть рівняння координати; 2) побудуйте графік залежності  $v_x(t)$ .

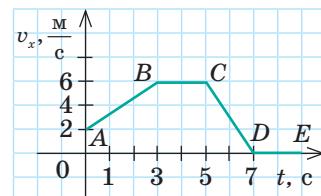


Рис. 1

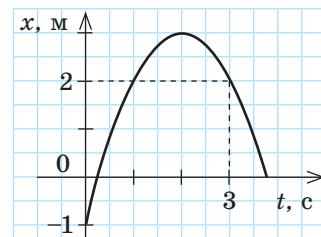


Рис. 2

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, виконані правильно, і полічіть суму балів. Поділіть цю суму на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



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

## ЧАСТИНА 2. ДИНАМІКА І ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ

### § 9. ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ. ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА



Галілео Галілей  
(1564-1642)



Чому кулька набирає швидкість? Чому прискорюється? Чому зупиняється? Як рухатиметься кулька, якщо кут нахилу зменшити до нуля? Наприкінці XVI ст. Галілео Галілей, розглядаючи рух різних тіл по похилій площині, здійснив уявний експеримент і дійшов висновку про існування явища *інерції* (від латин. *inertia* — бездіяльність).

#### 1 Згадуємо закон інерції

Що є «природним» для тіла — рух чи спокій? Давньогрецький філософ Аристотель стверджував, що спокій, адже для того, щоб тіло рухалося, потрібно діяти на нього певним чином, а якщо дія припиниться, тіло зупиниться. Здається, що наш повсякденний досвід підтверджує таку думку. Але чи дійсно це так?

Чому зупиняється тіла (рис. 9.1), якщо припинити їх штовхати, тягнути тощо? Чи зупиняється тіла, якщо зникне опір їхньому рухові?

Сподіваємося, ви правильно відповіли на запитання і дійшли думки, яку свого часу висловив і за допомогою уявного експерименту довів Г. Галілей: «Надана рухомому тілу швидкість буде зберігатися, якщо усунено зовнішні причини прискорення або сповільнення руху». Отже, «природним» для тіла є не лише стан спокою, а й прямолінійний рівномірний рух.

**Закон інерції Галілея:** тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває в стані спокою, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.

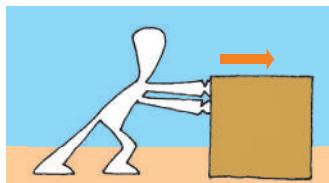
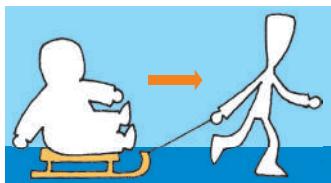


Рис. 9.1. До завдання в § 9



**Рис. 9.2.** Чим менше тертя (опір рухові тіла), тим більше горизонтальний рух тіла наближається до руху за інерцією

Тіло, на яке не діють інші тіла та поля, називають *ізольованим* (вільним), а *рух ізольованого тіла* — *рухом за інерцією*. У реальності практично неможливо створити умови, коли на тіло нічого не діє, тому *рухом за інерцією* називають *рівномірний прямолінійний рух за відсутності або скомпенсованості дій на тіло інших тіл і полів* (рис. 9.2).

## 2 Що постулює перший закон Ньютона

*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.*

Разом із тим стан руху і стан спокою залежать від вибору *системи відліку* (СВ). А чи в кожній СВ спостерігається явище інерції? З курсу фізики 9 класу ви добре знаєте, що в кожній.

Систему відліку, відносно якої спостерігається явище інерції, називають *інерціальною системою відліку*.

Уявіть, що ви сидите в купе потяга, який час від часу набирає швидкість, гальмує, здійснює поворот тощо. Зрозуміло, що СВ, пов'язана з потягом, буде *інерціальною* тільки тоді, коли потяг *рухається рівномірно прямолінійно*; в усіх інших випадках вона буде *неінерціальною*, адже відносно неї явище інерції не спостерігається (рис. 9.3).

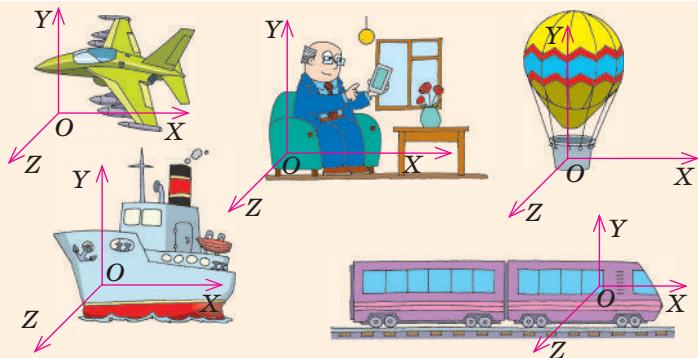
На якому рисунку (див. рис. 9.3, а–в) показано, що потяг набирає швидкість? гальмує? рухається рівномірно прямолінійно?

Найчастіше як інерціальну обирають СВ, жорстко пов'язану з точкою на поверхні Землі. Але цю систему можна вважати інерціальною тільки умовно,



**Рис. 9.3.** СВ, пов'язана з потягом, буде інерціальною, тільки коли потяг відносно Землі перебуває в стані спокою або рухається рівномірно прямолінійно (а); в усіх інших випадках ця СВ неінерціальна (б, в)

Якщо тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху відносно, наприклад, Землі, то й відносно СВ, що рухається відносно Землі з незмінною швидкістю, тіло теж буде зберігати стан спокою або рухатися рівномірно прямолінійно.



**Рис. 9.4.** Будь-яка СВ (пов'язана з літаком, потягом тощо), якщо вона рухається відносно інерціальної СВ (тут — пов'язані з будинком) рівномірно прямолінійно, теж є інерціальною

оскільки Земля обертається навколо своєї осі. Для точніших вимірювань використовують інерціальну СВ, пов'язану із Сонцем та далекими зорями.

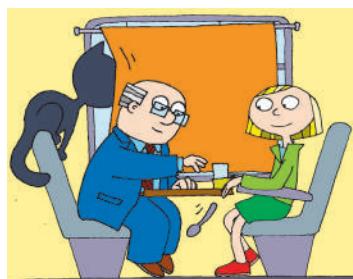
Якщо ми знаємо хоча б одну інерціальну СВ (наприклад, СВ, пов'язану з будинком на рис. 9.4), то можемо знайти багато інших (див. рис. 9.4).

Закон інерції Г. Галілея став першим кроком у встановленні основних законів класичної механіки. Формулюючи основні закони руху тіл, І. Ньютона назвав цей закон першим законом руху. У сучасній фізиці **перший закон механіки Ньютона** формулюють так:

**Існують такі системи відліку, відносно яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на нього не діють жодні сили або якщо ці сили скомпенсовані.**

У такому формулуванні перший закон Ньютона:

- постулює існування інерціальних СВ (стверджує, що вони існують);
- дає можливість з усіх наявних СВ виділити інерціальні СВ;
- містить закон інерції (умови рівномірного прямолінійного руху тіла).



**Рис. 9.5.** Жодними механічними експериментами не можна виявити, рухається вагон рівномірно прямолінійно чи перебуває у стані спокою. Пасажир і пасажирка можуть це з'ясувати, тільки подивившись у вікно

### 3 Принцип відносності Галілея

Розглядаючи рух тіл у різних інерціальних системах відліку, Г. Галілей дійшов висновку, який називають **принцип відносності Галілея**:

В усіх інерціальних системах відліку перебіг механічних явищ і процесів відбувається однаково за однакових початкових умов (рис. 9.5).

Галілей писав: «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 піднявшися на палубу, ми побачимо: виявляється, наш корабель рухається рівномірно прямолінійно...».



## Підбиваємо підсумки

- Закон інерції: тіло рухається рівномірно прямолінійно або перебуває в стані спокою, якщо на нього не діють інші тіла або їх дії скомпенсовані.
- Перший закон Ньютона: 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 СВ називають інерціальними.
  - Як інерціальні зазвичай використовують СВ, пов'язані із Землею. Будь-яка СВ, що рухається відносно інерціальної СВ рівномірно прямолінійно, теж є інерціальною. В усіх інерціальних СВ перебіг механічних явищ і процесів відбувається однаково за однакових початкових умов.

## 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.
4. Сформулюйте перший закон Ньютона. Що він стверджує?
5. Чи можна, перебуваючи в інерціальній СВ, за допомогою механічних експериментів з'ясувати, рухається ця система чи перебуває у стані спокою?



## Вправа № 9

1. Наведіть приклади тіл, які відносно Землі перебувають у стані спокою. Які сили діють на ці тіла? Що ви можете сказати про ці сили?
2. Які СВ, зображені на рис. 1, можливо, є інерціальними? Які СВ точно є неінерціальними? Обґрунтуйте свою відповідь.

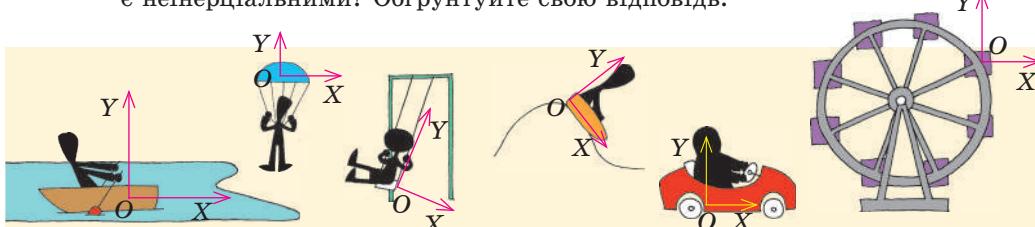


Рис. 1

3. Із вершини прямовисної скелі заввишки 20 м відірвався уламок. За падінням уламка спостерігають туристка, що стоїть на скелі, та пасажир яхти, яка рухається зі швидкістю 15 м/с. Для СВ1, пов'язаної з туристкою, і для СВ2, пов'язаної з пасажиром яхти, визначте переміщення та час падіння уламка, прискорення і швидкість його руху в момент падіння.
4. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, які органи чуттів здебільшого інформують людину про те, що вона перебуває в неінерціальній СВ.
5. На рис. 2 зображені тіла та сили, що на них діють (1 клітинка — 2 Н). Знайдіть напрямок і модуль рівнодійної сил, що діють на кожне тіло.

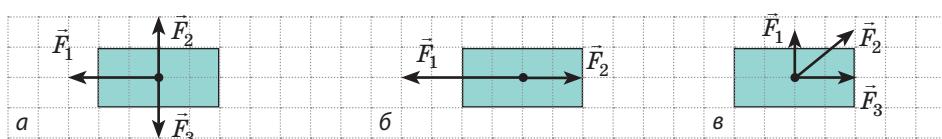


Рис. 2

## § 10. СИЛА. МАСА. ДРУГИЙ І ТРЕТИЙ ЗАКОНИ НЬЮТОНА



### 1 Згадуємо силу

Уявіть: розігнавшись на спортивному велосипеді, ви припинили крутити педалі. Врешті-решт велосипед обов'язково зупиниться — швидкість його руху поступово зменшиться до нуля. А от час зупинки велосипеда, а отже, і його прискорення суттєво залежать від того, чи натискаєте ви при цьому на гальмо. Тобто те саме тіло *в результаті різної дії (взаємодії) набуває різного прискорення*. Унаслідок різної дії тіло може також по-різному змінювати свої форму та розміри — *деформуватися*.

Кількісною мірою взаємодії є сила.

**Сила**  $\vec{F}$  у механіці — це векторна фізична величина, що є мірою взаємодії тіл, у результаті якої тіло набуває прискорення або деформується.



**Рис. 10.1.** Якщо ви, граючи у волейбол, ударите по м'ячу, то можете прискорити його рух, зупинити, змінити напрямок руху або закрутити — це залежить від напрямку, точки прикладення й сили удару

*Одиниця сили в СІ — ньютон:*

$$[F] = 1 \text{ Н (N).}$$

1 Н дорівнює сили, яка, діючи на тіло масою 1 кг, надає йому прискорення 1 м/с<sup>2</sup>.

У фізиці силою називають також дію одного тіла на інше. Наприклад, можна сказати: на м'яч діє сила пружності, — хоча насправді на м'яч діють руки волейболіста, дія яких характеризується силою пружності.

Результат дії сили  $\vec{F}$  залежить від модуля  $F$  цієї сили, її напрямку та місця прикладення (якщо тіло не є матеріальною точкою) (рис. 10.1).



Наведіть кілька простих прикладів (рух, спорт, приготування їжі та ін.), коли необхідно замислитися, яку силу (більшу чи меншу) слід прикласти і куди її спрямувати.

## 2 Чому тіла по-різному реагують на ту саму дію

Зміна швидкості руху тіла залежить не тільки від сили, яка діє на тілі: якщо до тенісного м'яча та металевого ядра прикласти однакову силу, швидкість руху ядра зміниться менше або для тієї самої зміни швидкості необхідно буде більше часу. Тобто *різним тілам властиво по-різному реагувати на ту саму дію*.

Властивість тіла, яка полягає в тому, що для зміни швидкості руху тіла під дією сили потрібен деякий час, називають **інертністю**.

Чим тіло інертніше, тим меншого прискорення воно набуває внаслідок тієї самої дії. У наведеному вище прикладі ядро інертніше за м'яч, адже внаслідок тієї самої дії воно повільніше за м'яч змінює швидкість свого руху. Інертні властивості тіла характеризує *інертна маса тіла*.

Будь-яке тіло має також властивість гравітаційно взаємодіяти з іншими тілами. Цю властивість характеризує *гравітаційна маса тіла*. *Інертна маса тіла дорівнює його гравітаційній масі*, тому далі говоритимемо просто про *масу тіла*.

**Маса  $m$**  — фізична величина, яка є мірою інертності та мірою гравітації тіла.

**Одиниця маси в СІ — кілограм:**  $[m]=1$  кг (kg).

1 кг дорівнює масі міжнародного еталона кілограма.

*Виміряти масу тіла означає порівняти*

*її з масою еталона*, тобто з масою тіла, масу якого взято за одиницю. Один із найпоширеніших способів прямого вимірювання маси тіла — *зважування* (маса — міра гравітації, тому тіла рівної маси однаково притягуються до Землі, а отже, її однаково тиснуть на опору).

Зважування — найзручніший спосіб вимірювання маси, однак не універсальний. Як, наприклад, виміряти масу молекули або масу Місяця, адже покласти ці об'єкти на ваги неможливо? У таких випадках використовують той факт, що маса — міра інертності. Якщо на два тіла масами  $m_1$  і  $m_2$  діють однакові сили, то *порівняти маси цих тіл можна, якщо визначити прискорення, набуті тілами в результаті дії цих сил*:

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



Спробуйте довести останнє твердження, спираючись на другий закон Ньютона, з яким ви ознайомилися в минулому навчальному році. Якщо не вийде, поверніться до цього питання після вивчення пункту 3 § 10.

### Основні властивості маси

1. **Маса тіла — величина інваріантна:** вона не залежить від вибору системи відліку, ані від швидкості руху тіла.

2. **У класичній механіці маса тіла — величина адитивна:** маса тіла дорівнює сумі мас усіх частинок, із яких складається тіло, а маса системи тіл дорівнює сумі мас тіл, що утворюють систему.

3. **У класичній механіці виконується закон збереження маси:** в ході будь-яких процесів у системі тіл загальна маса системи залишається незмінною; маса тіла не змінюється під час його взаємодії з іншими тілами.

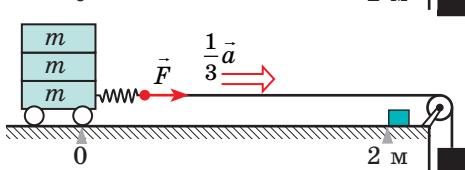
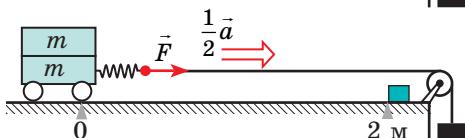
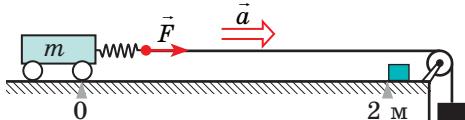
## 3

**Другий закон Ньютона**

Поставимо на тверду горизонтальну поверхню легкорухомий візок і тягнучимо його за допомогою вантажу. Масу вантажу для кожного досліду добиратимемо так, щоб розтягнення пружин під час руху візка було однаковим. Вимірюючи час  $t$ , протягом якого візок долає, наприклад, відстань  $s = 2$  м, визначатимемо прискорення руху візка ( $a = 2s/t^2$ ):

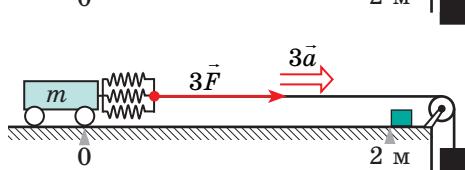
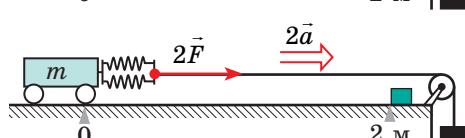
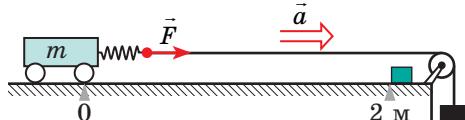
**Досліди на підтвердження другого закону Ньютона**

Маса тіла (візка) збільшується; сила, що діє на тіло, та сама



Результат досліду: прискорення, якого набуває тіло, обернено пропорційне масі цього тіла:  $a \sim \frac{1}{m}$ .

Маса тіла (візка) та сама; сила, що діє на тіло, збільшується



Результат досліду: прискорення, якого набуває тіло, прямо пропорційне прикладеній до тіла сили:  $a \sim F$ .

$$\text{Отже, } a \sim \frac{F}{m}.$$

Уявивши до уваги, що одиницю сили обирають так, що коефіцієнт пропорційності у виразі  $a \sim F/m$  дорівнює 1, сформулюємо **другий закон Ньютона**:

Прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії сили, прямо пропорційне цій сили та обернено пропорційне масі тіла:

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

• **Другий закон Ньютона**, записаний у вигляді  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , справдіжується тільки в інерціальних системах відліку.

• У більшості випадків на тіло діють кілька сил. Якщо тіло можна вважати матеріальною точкою, то всі ці сили можна замінити однією — рівнодійною. **Рівнодійна** дорівнює геометричній сумі сил, які діють на тіло:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$  (рис. 10.2), тому другий закон Ньютона зазвичай записують так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}, \text{ або } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$$

- Напрямок прискорення руху завжди збігається з напрямком рівнодійної сил, які діють на тіло:  $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{F}$ .

• Якщо сили, що діють на тіло, скомпенсовані, тобто *рівнодійна дорівнює нулю* ( $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ ), тіло не змінюватиме швидкості свого руху ані за значенням, ані за напрямком:  $\vec{a} = 0$  (рис. 10.3), отже, рухатиметься *рівномірно прямолінійно або перебуватиме у спокої*.

• Тіло рухається *рівноприскорено прямолінійно* тільки тоді, коли *рівнодійна* сил, прикладених до тіла, *не змінюється з часом*.

#### 4

### Третій закон Ньютона

«Дії завжди існує рівна й протилежна протидія, інакше: дії двох тіл одне на одне між собою рівні й напрямлені протилежно» — так І. Ньютон сформулював свою третю й останню «аксіому руху».



Які прояви третьої «аксіоми руху» ви зараз «бачите» навколо? з якими «зустрілися» впродовж дня? протягом минулого тижня?

**Сили завжди виникають парами:** якщо тіло А діє на тіло Б із силою  $\vec{F}_1$ , то обов'язково є «зворотна» сила  $\vec{F}_2$ , що діє на тіло А з боку тіла Б, причому сила  $\vec{F}_2$  дорівнює за модулем силі  $\vec{F}_1$  і протилежна їй за напрямком:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . А от прояви цих сил (або однієї з них) не завжди помітні. Наприклад, коли яблуко впало з яблуні, розбилось та прим'яло траву, ми бачимо і «дію», і «протидію». Також добре помітна дія Землі на яблуко (яблуко впало), а от протидію (притягання Землі до яблука) ми не помітимо.

Підкреслимо: «дія» і «протидія» — це завжди *сили однієї природи*, вони завжди *напрямлені вздовж однієї прямої* (рис. 10.4) — і сформулюємо **третій закон Ньютона** в сучасному вигляді:

Тіла взаємодіють із силами, що мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

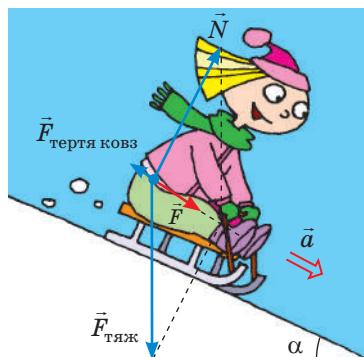


Рис. 10.2. Сила  $\vec{F}$  — рівнодійна сили тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , сили  $\vec{N}$  нормальної реакції опори і сили тертя ковзання  $\vec{F}_{\text{тертя ковзання}}$ . Сила  $\vec{F}$  — причина прискорення  $\vec{a}$  дівчинки

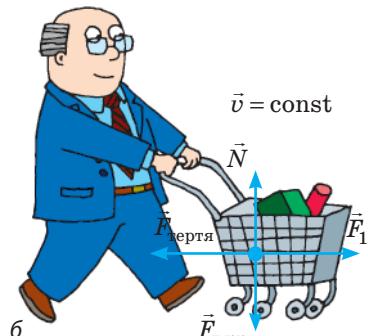
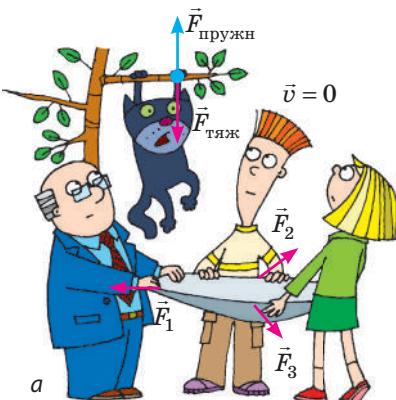
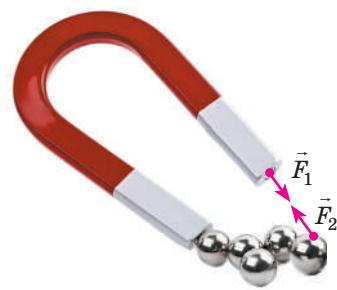


Рис. 10.3. Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то тіло перебуває в стані спокою (а) або рухається з незмінною швидкістю (б)



**Рис. 10.4.** Сили, що виникають під час взаємодії, мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком

### 5 Чи зміг би Мюнхгаузен витягнути себе за косицю з болота

За будь-якої взаємодії двох тіл виникає пара рівних за модулем і протилежних за напрямком сил. І дуже добре, що ці сили не мають рівнодійності, адже вони прикладені до різних тіл і тому не можуть зрівноважити (компенсувати) одну одну, інакше ми були б приречені на нерухомість або на безперервний рівномірний прямолінійний рух.

Дещо інша справа, коли точки, до яких прикладена пара сил, є частинами одного тіла (однієї системи матеріальних точок). У такому випадку векторна сума всіх внутрішніх сил системи дорівнює нулю ( $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$  — додаються пари рівних за модулем і протилежних за напрямком сил), тому *внутрішні сили не надають тілу прискорення* (завдяки внутрішнім силам тіло не може ані зсунутися з місця, ані зупинитися, ані змінити напрямок руху). Для того щоб тіло набуло прискорення, потрібні зовнішні сили.

>To чи зміг би барон Мюнхгаузен, герой відомого твору Р. Е. Распе, витягнути себе з болота за волосся? А як зміг би?



### Підбиваємо підсумки

- Сила  $\vec{F}$  — векторна фізична величина, яка є мірою дії на тіло з боку інших тіл, у результаті чого тіло набуває прискорення або (i) деформується. Одиниця сили в СІ — ньютон (Н). Якщо на матеріальну точку одночасно діють кілька сил, їх можна замінити рівнодійною ( $\vec{F}$ ):  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ .
- Основний закон динаміки — другий закон Ньютона: прискорення, якого набуває тіло під дією сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Цей закон виконується тільки в інерціальних СВ.
- Третій закон Ньютона — це закон взаємодії: тіла взаємодіють із силами, що мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Пара сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, не зрівноважують одну одну, оскільки прикладені до різних тіл.

### Контрольні запитання



- Охарактеризуйте силу та масу як фізичні величини.
- Дайте означення інертності.
- На яких властивостях тіла ґрунтуютьсяся кожний зі способів вимірювання маси?
- Від яких чинників залежить прискорення руху тіла?

5. Сформулюйте другий закон Ньютона. 6. Як записати другий закон Ньютона, якщо на тіло діють кілька сил? 7. Сформулюйте третій закон Ньютона. Наведіть приклади його прояву. 8. Коли пари сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, зрівноважують одну одну?



### Вправа № 10

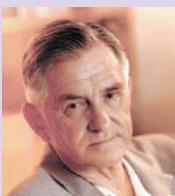
1. Завдяки інертності можна зекономити автомобільне пальне. Як і чому це можливо?
2. Чи буде рухатися візок (див. рисунок), якщо магніти досить потужні? Відповідь обґрунтуйте.
3. Більярдна куля під дією двох взаємно перпендикулярних сил 0,81 і 1,08 Н набуває прискорення 5 м/с<sup>2</sup>. Визначте масу кулі.
4. Із 1 січня 2018 р. в Україні діє закон, що обмежує швидкість руху транспортних засобів у населених пунктах 50 км/год, тоді як раніше було 60 км/год. У скільки разів сила удару в разі ДТП буде меншою, якщо шлях, який проходить транспортний засіб до зупинки, залишиться тим самим?
5. Дайте відповіді на запитання, поставлені на початку § 10.
6. Поясніть твердження: «Інертність — це властивість тіла, інерція — це явище природи».
7. Хлопець масою 60 кг стрибає з висоти 1,8 м. Із якою силою ноги хлопця вдаряться об землю, якщо він: 1) не зігнув коліна і час зупинки склав 0,1 с? 2) зігнув коліна, внаслідок чого час зупинки збільшився в 10 разів?
8. *Класична задача.* Кінь тягне віз. Відповідно до третього закону Ньютона: з якою силою кінь тягне віз, із такою самою силою віз тягне коня. Чому ж тоді віз рухається за конем, а не навпаки?
9. Придумайте кілька простих задач на застосування другого та третього законів Ньютона. Оформте і розв'яжіть отримані задачі. Скористайтеся додатковими джерелами інформації, щоб дані в умовах задач були реальними.



### Експериментальне завдання

Запропонуйте кілька експериментів для перевірки третього закону Ньютона. Проведіть такі експерименти.

### Фізика і техніка в Україні



**Олег Костянтинович Антонов** (1906–1984) — видатний український радянський літакобудівник, провідний авіаконструктор СРСР, академік АН УРСР і АН СРСР. О. К. Антонов — один із засновників радянського планеризму. Він створив понад 50 типів планерів, на яких було встановлено численні світові рекорди. Проте світову славу О. К. Антонов здобув як конструктор надійних пасажирських і транспортних літаків.

Із 1946 р. О. К. Антонов — головний, а з 1967 р. — генеральний конструктор дослідно-конструкторського бюро, яке зараз має назву Державне підприємство «Антонов».

Під керівництвом О. К. Антонова розроблено транспортні літаки Ан-8, Ан-12, Ан-22, Ан-26, Ан-32, Ан-72, багатоцільові літаки Ан-2, Ан-14, пасажирські літаки Ан-10, Ан-24 та ін. Транспортні літаки Ан-124 «Руслан» і Ан-225 «Мрія» і сьогодні незамінні для перевезень великовагітних вантажів.

НАНУ заснувала премію ім. О. К. Антонова за видатні досягнення в галузі технічної механіки та літакобудування.



## § 11. ГРАВІТАЦІЙНЕ ПОЛЕ. СИЛА ТЯЖІННЯ. ПЕРША КОСМІЧНА ШВІДКІСТЬ



Розрахувати орбіту нової планети вдалося англійцю Джону Адамсу і французу Урбену Левер'є. 23 серпня 1846 р. німецький астроном Йоганн Галле направив телескоп на місце, вказане Левер'є, і... побачив планету! Нептун — восьма планета Сонячної системи — стала першим космічним об'єктом, відкритим «на кінчику пера». Про закон, який дозволив зробити це відкриття, ви згадаєте в цьому параграфі.



«Місяць упав би на Землю як камінь, щойно зникла б сила його польоту».

Плутарх  
(бл. 46 — бл. 127 рр.)



«Тяжіння є взаємним прагненням усіх тіл. Якби Землю і Місяць не утримувала на орбітах їх оживляюча сила, то Земля і Місяць злилися б... Якби на Землі не існувало тяжіння, океани ринули б на Місяць».

І. Кеплер (1571–1630)



«Дотепер я пояснивав небесні явища та припливи наших морів на підставі сили тяжіння, але я не зазначав причин власне тяжіння».

І. Ньютона (1643–1727)



«У наш час тяжіння нікого не дивує — воно стало звичайним незрозумілим явищем».

Е. Мах (1838–1916)

Шість із восьми планет Сонячної системи були відкриті завдяки спостереженням за зоряним небом. Саме так у 1781 р. англійський астроном Джон Гершель відкрив Уран. Утім, планета «поводилася» дивно: її орбіта не відповідала розрахункам, заснованим на законі всесвітнього тяжіння. Учені припустили, що поряд є ще одна планета, яка впливає на рух Урану, та почали шукати її за допомогою... математики.

### 1

### Як визначити силу гравітаційного притягання

**Гравітаційна взаємодія** — взаємодія, яка є властивою всім тілам у Всесвіті та виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного.

Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою **гравітаційного поля**, яке існує навколо будь-якого тіла: зорі, планети, людини, молекули тощо.

Отримаємо закон всесвітнього тяжіння, йдучи за логікою міркувань І. Ньютона, якому й належить честь відкриття цього закону.

1. Завдяки гравітаційній взаємодії Земля надає всім тілам поблизу її поверхні прискорення  $g=F/m$  (другий закон Ньютона). Утім, це прискорення не залежить від маси тіла — це є можливим, якщо сила гравітаційної взаємодії прямо пропорційна масі тіла ( $F \sim m$ ).

2. Два тіла масами  $m_1$  і  $m_2$  взаємодіють із рівними за модулем силами (третій закон Ньютона):  $F_1 = F_2 = F$  (рис. 11.1). При цьому  $F_1 \sim m_1$ , а  $F_2 \sim m_2$ . Отже, сила гравітаційної взаємодії двох тіл прямо пропорційна добутку мас цих тіл:

$$F \sim m_1 \cdot m_2. \quad (1)$$

3. Проаналізувавши рух Місяця навколо Землі та спираючись на закони Кеплера (закони обертання планет навколо Сонця), Ньютон та-кож довів, що *сила гравітаційного притягання двох тіл обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F \sim \frac{1}{r^2}$*  (2).

Об'єднавши висновки (1) і (2), І. Ньютон одержав **закон всесвітнього тяжіння**:

Будь-які два тіла притягуються одне до одного із силою, яка прямо пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3)$$

де  $G$  — *гравітаційна стала* (коєфіцієнт пропорційності, однаковий для всіх тіл у Всесвіті).

Як і будь-який закон, закон всесвітнього тяжіння має певні *межі застосування* (рис. 11.2).

Уже в ХХ ст. було з'ясовано: коли гравітаційні поля настільки сильні, що розганяють тіла до швидкостей порядку швидкості світла, або коли частинки, що пролітають поблизу масивних тіл, ще на віддалі мають швидкість, порівнянну зі швидкістю світла, силу гравітаційного притягання не можна розрахувати за законом всесвітнього тяжіння.

У загальному випадку тяжіння описується загальною теорією відносності.

## 2 Як виміряти гравітаційну сталу

Гравітаційна стала  $G$  — одна з фундаментальних констант у фізиці. За сучасними даними, значення гравітаційної сталі становить:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

Із формули (3) випливає:  $G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2}$ . Тобто, якщо

$r=1$  м, а  $m_1 = m_2 = 1$  кг, то  $G$  чисельно дорівнює  $F$ .

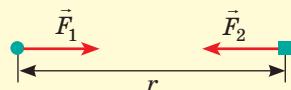
Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі гравітаційного притягання двох матеріальних точок масою 1 кг кожна, які перебувають на відстані 1 м одна від одної. У цьому й полягає фізичний зміст гравітаційної сталі.



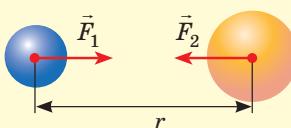
**Рис. 11.1.** Сили, з якими тіла притягуються одне до одного, рівні за модулем і протилежні за напрямком

Закон всесвітнього тяжіння справджується в таких випадках:

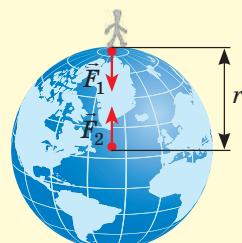
- якщо обидва тіла є матеріальними точками



- якщо обидва тіла мають кулясту форму зі сферичним розподілом речовини



- якщо одне з тіл, що взаємодіють, — куля, розміри та маса якої значно більші, ніж розміри та маса другого тіла



**Рис. 11.2.** Межі застосування закону всесвітнього тяжіння

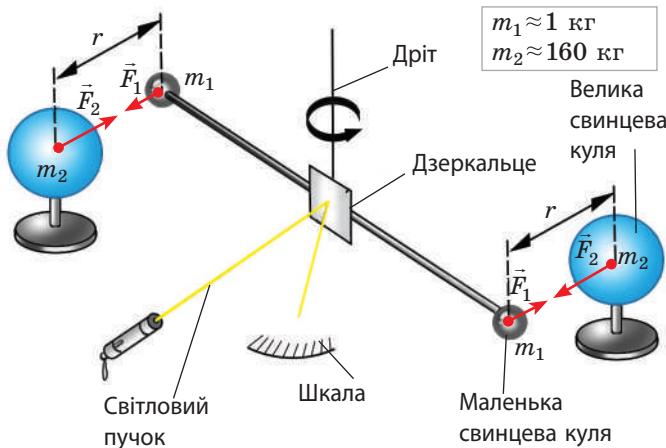


Рис. 11.3. Схема одного з перших дослідів Г. Кавендіша

1. У результаті притягання куль дріт закручується. Кут закручування дроту реєструють на шкалі за поворотом світлового пучка, який відбивається від дзеркальця.

2. За кутом закручування дроту визначають силу  $F$  гравітаційного притягання.

3. Вимірюють відстань  $r$  між центрами куль.

4. Знаючи маси  $m_1$  і  $m_2$  куль, обчислюють гравітаційну сталу:  $G = F \frac{r^2}{m_1 m_2}$ .

Виміряти гравітаційну сталу доволі складно: гравітаційне притягання між тілами стає помітним лише за дуже великої маси хоча б одного з тіл.

?

Визначте, з якою силою притягуються, наприклад, кулі масою 1 т кожна, розташовані на відстані 1 м одна від одної, і ви зрозумієте, чому ми не помічаемо гравітаційного притягання інших тіл, окрім притягання Землі.

Гравітаційну сталу вперше виміряв англійський учений *Генрі Кавендіш* (1731–1810) у 1798 р. за допомогою крутильних терезів (рис. 11.3).

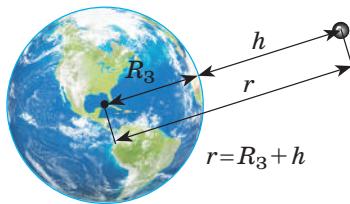
### 3 Як «зважити» Землю

Дослід Г. Кавендіша ще називають «зважуванням Землі». Тож дізнаємось, як можна виміряти масу Землі і взагалі будь-якої планети. Для цього згадаємо про силу тяжіння.

**Сила тяжіння**  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  — це сила, з якою Земля (або інше астрономічне тіло) притягує до себе тіла, що перебувають на її поверхні або поблизу неї.

Сила тяжіння направлена вертикально вниз і прикладена до точки, яку називають *центром тяжіння тіла* (див. § 14).

- Згідно із законом всесвітнього тяжіння модуль сили тяжіння, яка діє на тіло масою  $m$  з боку Землі, можна обчислити за формулою:

Рис. 11.4. Відстань  $r$  від центра Землі до тіла дорівнює сумі радіуса Землі  $R_3$  та висоти  $h$ , на якій перебуває тіло

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{m M_3}{(R_3 + h)^2}$$

Тут  $M_3$  — маса Землі;  $R_3 + h$  — відстань від центра Землі до тіла (рис. 11.4).

- Згідно з другим законом Ньютона:

$$F_{\text{тяж}} = mg,$$

де  $g$  — прискорення вільного падіння на висоті  $h$ .

Зрівнявши праві частини поданих виразів, отримаємо формулу для обчислення прискорення вільного падіння:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$$

Проаналізувавши останню формулу, dochidimo kількох vисновkіv.

1. Прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла (доведено Г. Галілеєм).
2. Прискорення вільного падіння зменшується в разі підняття тіла над поверхнею Землі (помітна зміна відбувається в разі підняття на десятки й сотні кілометрів).
3. Якщо тіло перебуває на поверхні Землі ( $h=0$ ) або поблизу неї ( $h \ll R_3$ ), прискорення вільного падіння обчислюють за формулою:

$$g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2}$$

Поблизу поверхні Землі прискорення вільного падіння відоме ( $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ ), отже, можемо визначити масу Землі:

$$M_3 = \frac{g_0 R_3^2}{G}.$$

Зазначимо, що через обертання Землі, а також через те, що форма Землі — геїд, прискорення вільного падіння залежить від географічної широти місцевості (рис. 11.5).

4

#### Що таке перша космічна швидкість і як її обчислити

Уявімо, що ми стріляємо з гармати в горизонтальному напрямку, з кожним пострілом збільшуєчи швидкість руху ядра. Ядра рухатимуться по параболі й щоразу падатимуть усе далі. Якщо уявити, що Земля є плоскою, на цьому наш експеримент можна було б і закінчити, але Земля має форму кулі, тому з кожним пострілом вона все більше й більше «йтиме» з-під ядра (рис. 11.6).

Тепер уявімо, що опір повітря відсутній, а ми надали ядру такої великої швидкості, що

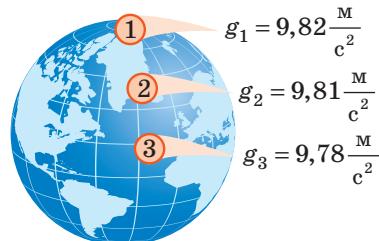


Рис. 11.5. Модуль прискорення вільного падіння на екваторі є трохи меншим, ніж на полюсах

Прискорення вільного падіння в певній місцевості може відрізнятися від його середніх значень на даній широті. Причини — в неоднорідності будови земної кори, наявності гір і западин; у різній густині порід, що залягають у надрах Землі. Так, зменшення прискорення вільного падіння часто свідчить про наявність у надрах торфу, нафти, газу; збільшення — про поклади металевих руд.

Метод пошуку покладів корисних копалин за точним визначенням прискорення вільного падіння називають *гравіметричною розвідкою*.

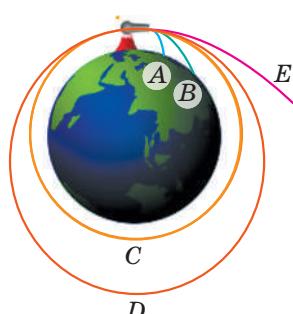
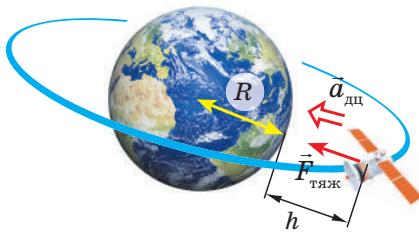


Рис. 11.6. Рух тіла під дією сили тяжіння (за рисунком І. Ньютона): ядра A і B падають на Землю, ядро C виходить на колову орбіту, D — на еліптичну, ядро E летить у відкритий космос



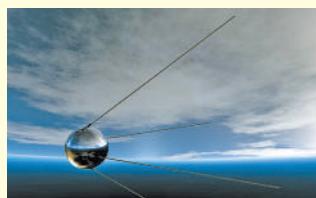
**Рис. 11.7.** На супутник, що рухається кількою орбітою на висоті  $h$  над поверхнею планети, діє одна сила — сила тяжіння  $F_{\text{тяж}}$ , яка і надає супутнику доцентрового прискорення  $\vec{a}_{\text{діс}}$

$F_{\text{тяж}} = ma_{\text{діс}}$ , де  $F_{\text{тяж}} = G \frac{mM}{(R+h)^2}$ ;  $a_{\text{діс}} = \frac{v^2}{R+h}$ . Отже,  $\frac{GM}{R+h} = v^2$ . Звідси отримуємо формулу для обчислення *першої космічної швидкості руху супутника на висоті  $h$  над поверхнею планети*:  $v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$  (1).

Для випадків поблизу поверхні Землі ( $h \approx 0$ ) формула (1) набуває вигляду:  $v = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3}}$  (2). Формулу (2) можна значно спростити, якщо згадати,

що поблизу поверхні Землі  $g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2}$ , тобто  $GM_3 = g_0 R_3^2$ . Підставивши останній вираз у формулу (2), остаточно маємо:  $v = \sqrt{g_0 R_3}$ .

Оскільки  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , а  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ , то  $v = \sqrt{9,8 \cdot 6,4 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ (м/с)} — перша космічна швидкість поблизу поверхні Землі.$



4 жовтня 1957 р. Радянський Союз вивів на орбіту перший штучний супутник Землі — ПС-1. Його розробили С. П. Корольов, М. В. Келдіш, М. К. Тихо-нравов та інші провідні вчені.

ПС-1 являв собою невелику сферу діаметром лише 58 см і масою 83,6 кг, оснащена чотирма антенами завдовжки 2,4 і 2,9 м для передавання сигналу. Супутник відокремився від другого ступеня ракети-носія на 315-й секунді після старту і майже відразу почав передавати сигнал, який чули не тільки фахівці, а й радіоаматори практично всіх країн. Із цього моменту почався відлік космічної ери людства. «Той маленький вогник, який стрімко рухався від краю й до краю неба... зробив людство безсмертним», — писав американський письменник-фантаст Рей Бредбері.

Протягом 92 діб польоту супутник здійснив 1440 обертів навколо Землі, після чого згорів в атмосфері.

Траєкторію руху супутника на карту зоряного неба першими нанесли спостерігачі Лабораторії космічних досліджень Ужгородського державного університету.



## Підбиваємо підсумки

- Взаємодію, яка є властивою всім тілам у Всесвіті й виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного, називають гравітаційною, а власне явище взаємного притягання тіл — всесвітнім тяжінням або гравітацією.
- Закон всесвітнього тяжіння: будь-які два тіла притягуються одне до одного із силою, яка прямо пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ , де  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравітаційна стала.
- Силу, яка характеризує гравітаційну взаємодію тіл із Землею (або з іншим астрономічним тілом), називають силою тяжіння. Сила тяжіння направлена вертикально вниз і прикладена до центра тяжіння тіла. Модуль сили тяжіння можна обчислити за формулами:  $F_{\text{тяж}} = G \frac{m M_3}{(R_3 + h)^2}$ ;  $F_{\text{тяж}} = mg$ .
- Швидкість  $v$ , яку необхідно надати об'єкту, щоб він рухався біля планети коловою орбітою, називають першою космічною швидкістю:  $v = \sqrt{\frac{GM}{R + h}}$ .

## Контрольні запитання



1. Наведіть приклади гравітаційної взаємодії.
2. Доведіть, що сила всесвітнього тяжіння прямо пропорційна добутку мас тіл.
3. Сформулюйте й запишіть закон всесвітнього тяжіння.
4. Яким є фізичний зміст гравітаційної сталої? Хто і як з'ясував її значення?
5. Якими є межі застосування закону всесвітнього тяжіння?
6. Дайте означення сили тяжіння. За якими формулами її обчислюють і як вона направлена?
7. Як розрахувати прискорення вільного падіння? Від яких чинників воно залежить?
8. Чому тіло, кинуте горизонтально, може так і не впасти на Землю?
9. Дайте означення першої космічної швидкості. Отримайте формулу для її обчислення.

## Вправа № 11



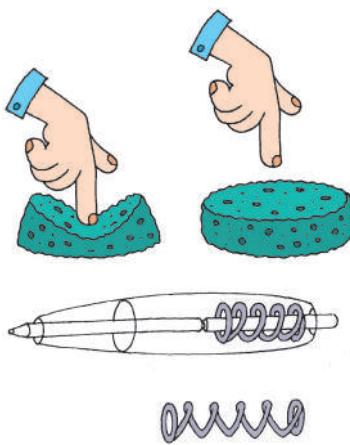
1. Ви надали тілу біля поверхні Землі швидкості 8 км/с. Чи повернеться тіло до вас, облетівши навколо Землі? Обґрунтуйте свою відповідь.
2. Оцініть силу гравітаційної взаємодії між вами і сусідкою або сусідом по парті. Поясніть, чому пропонується саме «оцінити», а не «обчислити».
3. Як зміниться сила притягання між двома кульками, якщо одну з них замінити іншою, утрічі більшої маси? утрічі збільшити відстань між ними?
4. У скільки разів прискорення вільного падіння на висоті  $6R_3$  менше, ніж на поверхні Землі?
5. Визначте масу Сонця, вважаючи, що орбіта Землі є колом і що радіус земної орбіти дорівнює  $1,5 \cdot 10^{11}$  м (1 астрономічна одиниця).
6. Визначте період обертання та радіус колової орбіти першого штучного супутника Землі.
7. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про життя і діяльність видатного українського радянського вченого в галузі ракетобудування та космонавтики С. П. Корольова (див. [рисунок](#)).



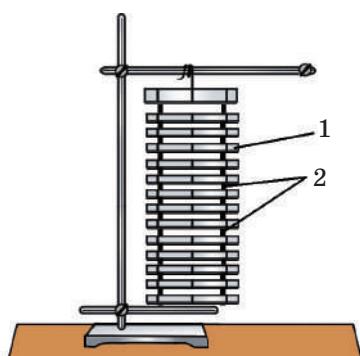
Сергій Корольов (справа) і перша у світі жінка-космонавт Валентина Терешкова, 1963 р.



## § 12. СИЛА ПРУЖНОСТІ. ВАГА ТІЛА



**Рис. 12.1.** Після припинення дії сили пружні тіла відновлюють свої форму та розміри



**Рис. 12.2.** Механічна модель твердого тіла: паралельні пластини (1), що імітують шари молекул, з'єднані пружинами (2), що імітують взаємодію між молекулами

Перший у світі космонавт Ю. О. Гагарін згадував: «Я відчув, що якась нездоланна сила дедалі більше втискає мене в крісло. І хоч воно було розташоване так, щоб максимально зменшити вплив велетенської ваги, яка навалилася на мое тіло, було важко ворухнути рукою й ногою». Про те, як і чому виникають перевантаження, за яких умов тіло перебуває у стані невагомості, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Згадуємо про деформацію

Натиснемо на кнопку кулькової ручки — пружина всередині ручки стиснеться, і довжина пружини зменшиться; помнемо в руці шматочок пластиліну — зміниться його форма; натиснемо пальцем на гумку — одночасно зміниться і форма, і розміри гумки.

Зміну форми та (або) розмірів тіла називають **деформацією**.

Якщо припинити стискати пружину, тиснути на гумку, тобто усунути дію зовнішніх сил, і пружина, і гумка повністю відновлять свою форму та розміри, тобто перестануть бути деформованими (рис. 12.1). А от форма шматочка пластиліну не відновиться — пластилін її «не пам'ятає» і залишиться деформованим.

Деформації, які повністю зникають після припинення дії на тіло зовнішніх сил, називають **пружними**; деформації, які зберігаються, називають **пластичними**.

Причина виникнення і пружної, і пластичної деформацій полягає в тому, що під дією сил, прикладених до тіла, його різні частини зміщуються одна відносно одної. За характером зміщення частин розрізняють *деформації стиснення, розтягнення, зсуву, вигину, кручення*. Зупинимося на пружній деформації стиснення та розтягнення. Для цього скористаємося механічною моделлю твердого тіла (рис. 12.2).

Натиснемо на модель твердого тіла зверху рукою: верхні пластини почнуть переміщуватися вниз, нижні залишаться майже нерухомими, і в результаті модель змінить

розміри — деформується. Приблизно так само під час стискання твердого тіла зміщуються в напрямку дії сили шари його молекул, унаслідок чого розміри тіла зменшуються. Таку деформацію називають *деформацією стиснення* — її зазнають ніжки столів і стільців, фундаменти будинків тощо (див. рис. 12.3, а).

Якщо ж тіло розтягувати, шари молекул розійдуться і тіло також змінить свої розміри. Таку деформацію називають *деформацією розтягнення* — її зазнають троси, ланцюги в підйомальних пристроях, стяжки між вагонами тощо (див. рис. 12.3, б).

Фізичну величину, яка дорівнює зміні довжини тіла при деформації розтягнення або стиснення, називають **видовженням**  $\Delta l$  (або  $x$ ):

$$\Delta l = l - l_0,$$

де  $l$  — довжина деформованого тіла;  $l_0$  — початкова довжина тіла (рис. 12.4).

2

## Коли виникає сила пружності

Якщо ви згинаєте гілку дерева, стискаєте еспандер, натягуете тятиву лука, тобто деформуєте ці тіла, ви відчуваєте їхній опір: з боку цих тіл починає діяти сила, яка прагне відновити той стан тіла, в якому тіло перебувало до деформації. Цю силу називають *силою пружності* (рис. 12.5).

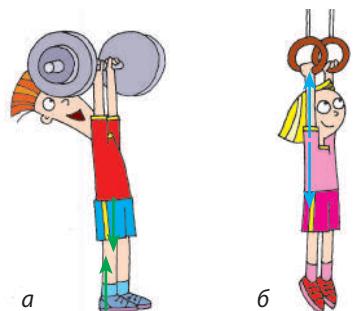
**Сила пружності**  $\vec{F}_{\text{пруж}}$  — це сила, яка виникає під час деформації тіла і намагається повернути тіло в недеформований стан.

Вивчаючи деформацію тонких довгих стрижнів, англійський природознавець *Роберт Гук* (1635–1703) установив закон, який згодом отримав назву **закон Гука**:

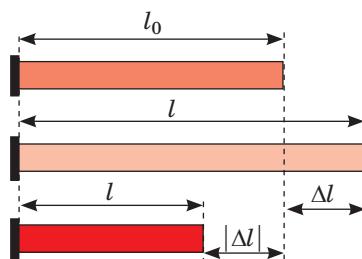
У разі малих пружних деформацій розтягнення або стиснення сила пружності прямо пропорційна видовженню тіла:

$$\vec{F}_{\text{прям}} = -k\vec{x}$$

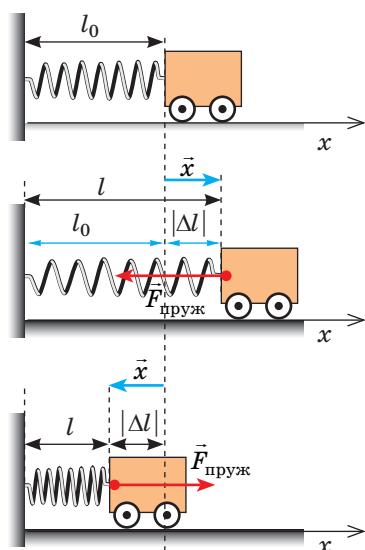
Знак «-» показує, що сила пружності направлена в бік, протилежний видовженню.



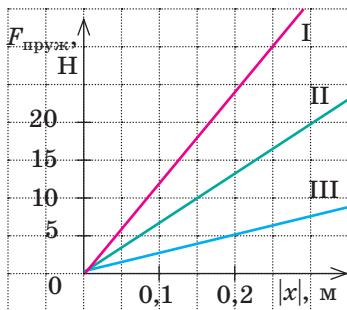
**Рис. 12.3.** Кістки, м'язи, зв'язки людини зазнають і деформації стиснення (а), і деформації розтягнення (б)



**Рис. 12.4.** Деформації стиснення та розтягнення стрижня;  $\Delta l$  — видовження стрижня



**Рис. 12.5.** Сила пружності  $\vec{F}_{\text{пруж}}$  завжди прагне повернути тіло в недеформований стан. Тут  $\vec{x}$  — вектор видовження



**Рис. 12.6.** У разі малих пружніх деформацій графік залежності сили пружності від модуля видовження тіла — пряма лінія

Закон Гука можна записати і для модулів:

$$F_{\text{пруж}} = k|x| = k|\Delta l|,$$

де  $x = \Delta l$  — видовження.

Оскільки сила пружності прямо пропорційна видовженню тіла, то графік залежності  $F_{\text{пруж}}(|x|)$  — пряма лінія (рис. 12.6).

Коефіцієнт пропорційності  $k$  називають **жорсткістю** тіла (стрижня, балки, шнура, пружини\*). Жорсткість тіла можна визначити, скориставшись законом Гука:

$$F_{\text{пруж}} = k|x| \Rightarrow k = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|}.$$

**Одниця жорсткості в СІ — ньютон на метр:**  $[k] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$ .

- **Жорсткість** — це характеристика тіла, тому вона не залежить від сили пружності, ані від видовження тіла.
- **Жорсткість залежить:** від пружніх властивостей матеріалу, з якого виготовлене тіло; від форми тіла та його розмірів (див. § 35).



За графіками на рис. 12.6 визначте жорсткості тіл I–III. Чи можете ви відразу, не виконуючи розрахунків, визначити, яке тіло має найбільшу жорсткість?

**3**

### Якою є природа сили пружності

Відомо, що всі тіла складаються з атомів (молекул, іонів), а ті, у свою чергу, — з ядра, яке має позитивний заряд, і електронної хмари, заряд якої негативний. Між зарядженими складниками частинок речовини існують сили електромагнітного притягання та відштовхування.

Якщо тіло не деформоване, сили притягання дорівнюють силам відштовхування. Під час деформації взаємне розташування частинок у тілі змінюється. Якщо відстань між частинками збільшується, то електромагнітні сили притягання стають більшими, ніж сили відштовхування, і частинки починають притягуватися одна до одної. Якщо відстань між частинками зменшується, то більшими стають сили відштовхування. Інакше кажучи, частинки речовини «прагнуть» повернутися до стану рівноваги. Таким чином, **сила пружності — результат електромагнітної взаємодії частинок речовини**.

**4**

### Деякі види сил пружності. Вага тіла

Зазвичай силу пружності позначають символом  $\bar{F}_{\text{пруж}}$ . Однак є сили пружності, для позначення яких використовують окремі символи.

Якщо тіло розташоване на опорі, то опора деформується (прогинається). Деформація опори спричиняє появу сили пружності, яка діє на тіло

\* Дріт, із якого виготовлена пружина, зазнає деформації кручення, але сила пружності, що виникає при розтягненні й стисненні пружини, підпорядковується закону Гука.

перпендикулярно до поверхні опори. Цю силу називають **силою нормальної реакції опори** та позначають символом  $\vec{N}$  (рис. 12.7).

Якщо тіло закріпiti на підвісі (нитці, джгуті, шнурі), то підвіс деформується (розтягнеться) і діятиме на тіло з певною силою пружності, напрямленою *вздовж підвісу*, — **силою натягу підвісу**  $\vec{T}$  (рис. 12.8).

Усі тіла внаслідок гравітаційного притягання стискають або прогинають опору або розтягують підвіс. Силу, яка характеризує таку дію тіл, називають **вагою** і позначають символом  $\vec{P}$ .

На рис. 12.9, 12.10 показано, як виникає ця сила, якщо тіло розташоване біля поверхні Землі і діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс.

У таких випадках відповідно до третього закону Ньютона вага тіла за модулем дорівнює силі нормальної реакції опори або силі натягу підвісу та напрямлена протилежно їм:  $\vec{P} = -\vec{N}$ ;  $\vec{P} = -\vec{T}$ . Саме такі випадки виникнення ваги тіла ми розглядатимемо далі.

**Зверніть увагу!** Якщо тіло перебуває у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху, то вага тіла за модулем дорівнює силі тяжіння ( $\vec{P} = m\vec{g}$ ) і збігається з нею за напрямком. Дійсно, в такому випадку сила тяжіння і сила нормальної реакції опори (або сила натягу підвісу) скомпенсовані, тому вони рівні за модулем і протилежні за напрямком:  $\vec{N} = -m\vec{g}$  ( $\vec{T} = -m\vec{g}$ ); оскільки  $\vec{P} = -\vec{N}$  ( $\vec{P} = -\vec{T}$ ), маємо:  $\vec{P} = m\vec{g}$ . Але, на відміну від сили тяжіння, яка прикладена до тіла, *вага прикладена до опори або підвісу*.

Вага тіла і сила тяжіння різняться й своєю природою: сила тяжіння — це гравітаційна сила, а природа *ваги тіла* — електромагнітна.

### 5 За яких умов вага тіла змінюється

Нам здається, що в невагомості перебувають тільки космонавти на орбіті, а перевантаження зазнають лише льотчики під час виконання фігур вищого пілотажу та космонавти. Але це не так.

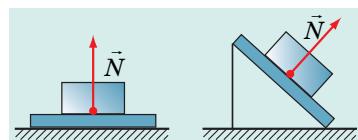


Рис. 12.7. Сила нормальної реакції опори напрямлена перпендикулярно до поверхні опори

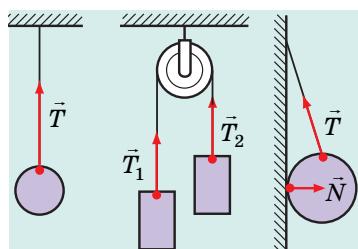


Рис. 12.8. Сила натягу підвісу напрямлена вздовж підвісу

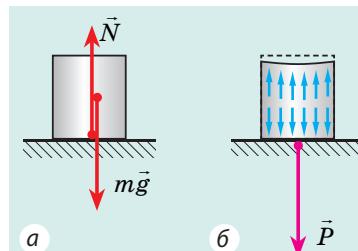


Рис. 12.9. Дії сили тяжіння та сили реакції опори спричиняють деформацію стиснення (а). Тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, тисне на опору із силою пружності  $\vec{P}$  (б)

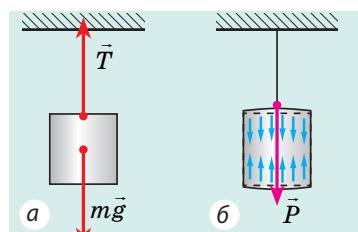
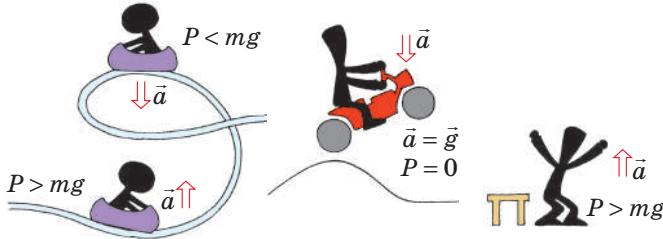
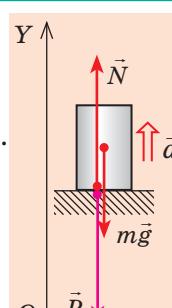
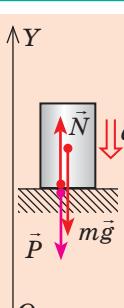


Рис. 12.10. Дії сили тяжіння та сили натягу підвісу спричиняють деформацію розтягнення (а). Тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, розтягає підвіс із силою пружності  $\vec{P}$  (б)

Розгляньте рис. 12.11 і зробіть висновки: куди напрямлене прискорення руху тіла, коли тіло зазнає перевантаження? відчуває зменшення ваги? Чому дорівнює прискорення, коли тіло перебуває у стані невагомості?



**Рис. 12.11.** Усі ми час від часу зазнаємо перевантажень ( $P > mg$ ), відчуваємо зменшення ваги ( $P < mg$ ) або перебуваємо у стані невагомості ( $P = 0$ )

Збільшення ваги (перевантаження)	Зменшення ваги
<p>Розглянемо тіло, яке перебуває на опорі та разом із нею рухається в гравітаційному полі Землі з прискоренням <math>\vec{a}</math>. На тіло діють дві сили: сила тяжіння <math>m\vec{g}</math> і сила нормальній реакції опори <math>\vec{N}</math>. Пов'яжемо систему координат із Землею та спрямуємо вісь <math>OY</math> вертикально вгору. Відповідно до другого закону Ньютона: <math>m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}</math>. Запишемо це рівняння в проекціях на вісь <math>OY</math> для двох випадків.</p> <p><b>1. Прискорення напрямлене вертикально вгору</b></p> <p><math>OY: -mg + N = ma \Rightarrow N = mg + ma = m(g + a)</math>. Відповідно до третього закону Ньютона <math>P = N</math>. Остаточно маємо: <math>P = m(g + a)</math>.</p>  <p><b>2. Прискорення напрямлене вертикально вниз</b></p> <p><math>OY: -mg + N = -ma \Rightarrow N = mg - ma = m(g - a)</math>. Відповідно до третього закону Ньютона <math>P = N</math>. Остаточно маємо: <math>P = m(g - a)</math>.</p> 	<p><i>Вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, більша, ніж вага цього тіла в стані спокою.</i></p> <p><i>Коли є перевантаження, не тільки тіло сильніше тисне на опору, але й окремі частини тіла сильніше тиснуть одна на одну.</i></p> <p><i>Вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, менша, ніж вага цього тіла в стані спокою. Якщо в цьому випадку прискорення руху тіла дорівнює прискоренню вільного падіння (<math>\vec{a} = \vec{g}</math>), вага тіла дорівнює нулю і тіло не діє на опору.</i></p>

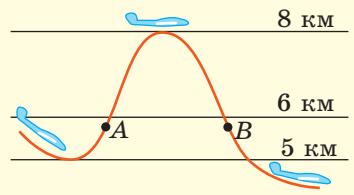
## 6 Як відчути стан невагомості

Стан тіла, за якого вага тіла дорівнює нулю, називають **станом невагомості**.

У стані невагомості на тіло діє тільки сила тяжіння (тіло вільно падає), і навпаки: якщо тіло рухається тільки під дією сили тяжіння, воно перебуває у стані невагомості.

У стані невагомості не тільки тіло не тисне на опору, але й окремі частини тіла не тиснуть одна на одну; космонавт на орбіті (згадайте: на орбіті космічний корабель рухається тільки під дією сили тяжіння) не відчуває своєї ваги, предмет, випущений із його рук, нікуди не падає. Річ у тім, що сила тяжіння надає кожному тілу та будь-якій частині тіла однакового прискорення.

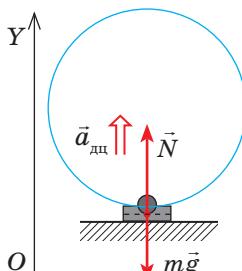
Щоб відчути стан невагомості, достатньо просто підстрибнути. А от для тренування космонавтів використовують той факт, що тіло, кинуте під кутом до горизонту, під дією сили тяжіння рухається по параболі. Якщо у верхніх шарах атмосфери літак спрямувати по висхідній траєкторії («кинути» його під кутом до горизонту) і суттєво зменшити тягу двигунів, то деякий час усі тіла в літаку перебуватимуть у стані невагомості.



## 7 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Літак виконує «мертву петлю», описуючи у вертикальній площині коло радіуса 250 м. У скільки разів вага льотчика в нижній частині траєкторії більша за силу тяжіння, якщо швидкість руху літака 100 м/с?

**Аналіз фізичної проблеми.** Літак рухається по колу, отже, льотчик має доцентрове прискорення. Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зобразимо сили, що діють на льотчика, і направоки його прискорення. Оберемо одновимірну систему координат, яку пов'яжемо з точкою на поверхні Землі, вісь  $OY$  спрямуємо вертикально вгору.



**Дано:**

$$r = 250 \text{ м}$$

$$v = 100 \text{ м/с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\frac{P}{F_{\text{тіж}}} = ?$$

**Розв'язання.** За другим законом Ньютона:  $\vec{mg} + \vec{N} = \vec{ma}_{\text{дц}}$ .

У проекціях на вісь  $OY$ :

$$-mg + N = ma_{\text{дц}} \Rightarrow N = m(a_{\text{дц}} + g).$$

За третім законом Ньютона  $P = N$ , тому  $P = m(a_{\text{дц}} + g)$ . Остаточно маємо:

$$\frac{P}{F_{\text{тіж}}} = \frac{m(a_{\text{дц}} + g)}{mg} = \frac{a_{\text{дц}} + g}{g}, \text{ де } a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[a_{\text{дц}}] = \frac{(\text{м/с})^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad a_{\text{дц}} = \frac{100^2}{250} = 40 \text{ (м/с}^2\text{)};$$

$$\frac{P}{F_{\text{тіж}}} = \frac{40 \text{ м/с}^2 + 10 \text{ м/с}^2}{10 \text{ м/с}^2} = 5.$$

**Аналіз результату.** Вага льотчика в 5 разів більша за силу тяжіння — це реальний результат.

**Відповідь:**  $P/F_{\text{тіж}} = 5$ .

### Алгоритм розв'язування задач на рух тіла під дією кількох сил

1. Прочитайте умову задачі. З'ясуйте, які сили діють на тіло, яким є характер його руху (рухается 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 позначте сили, що діють на тіло, і направоки прискорення руху тіла.

4. Виберіть інерціальну систему відліку. Кількість осей координат і їх направок оберіть з огляду на умову задачі.

5. Запишіть рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на осі координат. Запишіть формулі для обчислення сил. Одержані систему рівнянь, розв'яжіть її. Якщо в задачі є додаткові умови, використайте їх.

6. Перевірте одиницю, знайдіть числове значення шуканої величини.

7. Проаналізуйте результат. Запишіть відповідь.



## Підбиваємо підсумки

• Деформацією називають зміну форми або (i) розмірів тіла. Якщо після припинення дії на тіло зовнішніх сил деформація повністю зникає, це пружна деформація; якщо деформація зберігається, це пластична деформація.

• Силу, яка виникає в тілі в разі його деформації і намагається повернути тіло в недеформований стан, називають силою пружності. Сила пружності має електромагнітну природу, її можна розрахувати за законом Гука:  $\vec{F}_{\text{пруж}} = -k\vec{x}$ , де  $k$  — жорсткість тіла. Закон Гука виконується тільки в разі малих пружніх деформацій.

• Вага тіла  $\vec{P}$  — це сила, з якою внаслідок гравітаційного притягання тіло тисне на опору або розтягує підвіс. Якщо опора горизонтальна або підвіс вертикальний, то відповідно до третього закону Ньютона вага тіла дорівнює за модулем і протилежна за напрямком силі нормальної реакції опори (силі натягу підвісу):  $\vec{P} = -\vec{N}$  ( $\vec{P} = -\vec{T}$ ).

♦ Якщо тіло перебуває у стані спокою або рухається рівномірно прямолінійно, то вага тіла за модулем дорівнює силі тяжіння:  $P = mg$ .

♦ Якщо тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, це тіло зазнає перевантаження (вага тіла більша, ніж його вага у стані спокою):  $P = m(g + a)$ .

♦ Якщо тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, вага тіла менша, ніж його вага у стані спокою:  $P = m(g - a)$ .



## Контрольні запитання

- Що таке деформація? У чому причина її виникнення?
- Які види деформацій ви знаєте? Які деформації називають пружними? пластичними? Наведіть приклади.
- Дайте означення сили пружності. Якою є її природа?
- Сформулюйте закон Гука. Які межі його застосування?
- Від чого залежить жорсткість тіла? Яка одиниця жорсткості в СІ?
- Яку силу називають силою нормальної реакції опори? силою натягу підвісу? Як напрямлені ці сили? Наведіть приклади.
- Що таке вага? Чим вага тіла відрізняється від сили тяжіння?
- Поясніть причину виникнення ваги тіла.
- Що таке невагомість? За яких умов тіло перебуває у стані невагомості?
- За яких умов тіло зазнає перевантаження?

## Фізика в цифрах

- $P=0$  — відсутність навантаження (стан невагомості).
- $P=mg$  — «нормальне» навантаження (на поверхні Землі).
- $P=3\ mg$  — максимальне навантаження, що відчувається на «американських гірках».
- $P=4,3\ mg$  — максимальне навантаження, на яке розраховані пасажирські літаки.
- $P=5\ mg$  — навантаження, за якого більшість людей непрітомнюють.
- $P=9\ mg$  — навантаження, яке витримує людина за штурвалом винищувача під час крутих віражів.



## Вправа № 12

- На скільки видовжиться гумовий шнур під дією сили 5 Н, якщо жорсткість шнура 25 Н/м?
- На рис. 1 показано траєкторію автомобіля. У якій точці траєкторії вага водія дорівнює силі тяжіння? У якій точці водій автомобіля зазнає перевантаження, а в якій — зменшення ваги?
- Під дією тягара масою 10 кг дріт видовжився на 1 мм. Яка жорсткість дроту?
- У ліфті встановлено динамометр, на якому підвішено тіло масою 1 кг. Що показує динамометр, коли прискорення ліфта: а) дорівнює нулю; б) дорівнює  $5 \text{ м/с}^2$  і напрямлене вертикально вниз; в) дорівнює  $5 \text{ м/с}^2$  і напрямлене вертикально вгору?
- Визначте вагу автомобіля в точках *Б* і *В* (див. рис. 1), якщо він рухається з незмінною швидкістю 54 км/год, а його маса дорівнює 2 т. Із якою швидкістю має рухатись автомобіль, щоб у точці *Б* опинитись у стані невагомості?
- Відерце з водою обертають у вертикальній площині на мотузці завдовжки 1 м. Із якою найменшою швидкістю потрібно обертати відерце, щоб у момент проходження верхньої точки вода з нього не виливалась?
- Ракета-носій із космічним кораблем стартує з поверхні Землі, рухаючись із прискоренням  $30 \text{ м/с}^2$ . Визначте вагу космонавта, який при цьому перебуває на борту корабля, якщо його маса 75 кг. Чому крісло космонавтів під час зльоту та посадки розташовують так, щоб прискорення було напрямлено перпендикулярно до тулуба космонавта, а не вздовж нього?
- Доведіть, що жорсткість  $k$  системи двох пружин жорсткостями  $k_1$  і  $k_2$  можна розрахувати за формулами, поданими на рис. 2.
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, як впливає на здоров'я та стан людини значне перевантаження; тривале перевування у стані невагомості.
- На початку § 7 ішлося про цирковий номер «Людина — гарматне ядро». Якого навантаження зазнає спортсмен під час пострілу? Необхідні дані знайдіть у додаткових джерелах інформації.
- Коли виникає сила тертя? Чи завжди ця сила заважає рухові тіла?

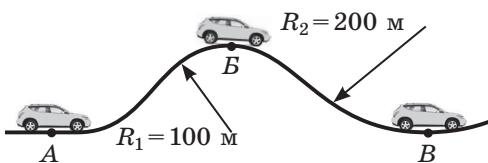


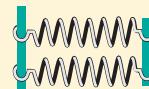
Рис. 1

**З'єднання пружин**  
Послідовне



$$\frac{1}{k_{\text{посл}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

Паралельне



$$k_{\text{пар}} = k_1 + k_2$$

Рис. 2



## Експериментальне завдання

Жорсткість тіла суттєво залежить від його форми. Доведіть це, використавши декілька однакових смужок паперу, дві книжки та невеликий вантаж. Надайте смужкам різної форми (див., наприклад, рис. 3) і дослідіть їхню деформацію внаслідок дії однакової сили.



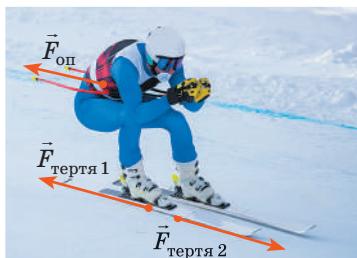
Рис. 3



## § 13. СИЛА ТЕРТЯ



Чому профілі сучасних літаків та підводних човнів нагадують контури тіла дельфіна? Чому взимку автомобілі «перевзувають» у шиповану гуму? Чому так важко рухатися в ожеледицю? Як «падає» парашутист? Як зменшити силу тертя? А може, її зовсім не варто зменшувати, а навпаки, слід збільшувати? Що буде, якщо тертя зникне зовсім? Поміркуємо.



**Рис. 13.1.** Відносно поверхні снігу та відносно повітря лижник рухається вправо, тому сила тертя  $\vec{F}_{\text{тертя}1}$  і сила опору  $\vec{F}_{\text{оп}}$ , які діють на лижника, напрямлені вліво. Сніг відносно лижника рухається вліво, з боку лижника на сніг діє сила тертя  $\vec{F}_{\text{тертя}2}$ , напрямлена вправо

### 1

#### Згадуємо силу тертя

У ході будь-якого руху тіло обов'язково контактує з мікро- або макротілами навколо (поверхнею іншого тіла, частинками рідини або газу, всередині яких тіло рухається, тощо). Під час такого контакту виникають сили, що сповільнюють рух тіла, — *сили тертя*.

**Сила тертя**  $\vec{F}_{\text{тертя}}$  — це сила, яка виникає під час руху чи спроби руху одного тіла по поверхні іншого або під час руху тіла всередині рідкого чи газоподібного середовища.

*Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхні дотичних тіл і протилежно напрямку швидкості їх відносного руху* (рис. 13.1).

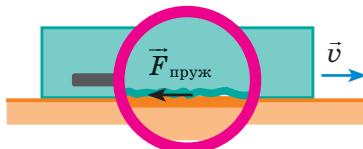
Тертя між поверхнею твердого тіла і навколоїшнім рідким або газоподібним середовищем називають *опором середовища* або *рідким (в'язким) тертям*. Тертя між поверхнями двох дотичних твердих тіл називають *сухим тертям*.

### 2

#### Чому виникає сила сухого тертя

Якщо взяти лупу та розглянути поверхню будь-якого тіла, побачимо величезну кількість дрібних нерівностей. Коли одне тіло ковзає або намагається ковзати по поверхні іншого, нерівності чіпляються одна за одну й деформуються. Виникають *сили пружності*, напрямлені в бік, протилежний деформації (рис. 13.2). Це одна з причин виникнення сили сухого тертя.

Є й інші причини. Так, у деяких місцях виступи тіл щільно притиснуті один



**Рис. 13.2.** Один із механізмів виникнення сухого тертя пов'язаний із наявністю нерівностей на поверхнях дотичних тіл

до одного — відстань між ними настільки мала, що діють сили міжмолекулярного притягання, в результаті чого виступи виявляються ніби «склеєними». Зрозуміло, що таке «склеювання» відбувається в ході всього руху й перешкоджає йому.

І сила пружності, і сила міжмолекулярного притягання мають електромагнітне походження, тож *природа сили сухого тертя — електромагнітна*.

На рис. 13.3 знайдіть щонайменше два приклади, коли змінюють силу сухого тертя, збільшуючи чи зменшуючи нерівності поверхонь.

### 3 Які існують види сухого тертя

Розрізняють три види сухого тертя: *тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення*.

Спробуйте, прикладаючи невелику силу, зрушити з місця важкі санки, — санки не зрушаться, бо виникне *сила тертя спокою*, яка зрівноважить прикладену зовнішню силу.

**Сила тертя спокою**  $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$  — це сила тертя, яка виникає між дотичними поверхнями двох тіл і перешкоджає виникненню їх відносного руху.

*Сила тертя спокою завжди дорівнює за модулем і протилежна за напрямком рівнодійній зовнішніх сил*  $\vec{F}_{\text{зовн}}$ , які намагаються зрушити тіло з місця (рис. 13.4):

$$\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн}}$$

Чим більшу силу прикладатимемо, тим більшою буде сила тертя спокою. Нарешті за певного значення рівнодійної зовнішніх сил (а отже, і сили тертя спокою) тіло зрушить із місця. Тобто *сила тертя спокою має певне максимальне значення*.

Найчастіше дія сили тертя спокою є «корисною»: завдяки їй речі не вислизують із рук, крейда залишає слід на дощці, грифель олівця — слід на папері; ця сила дозволяє виконувати повороти, утримує коріння рослин у ґрунті. Завдяки силі тертя спокою пересуваються люди, тварини, транспорт (рис. 13.5).



Рис. 13.3. До завдання в § 13

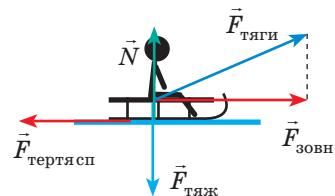
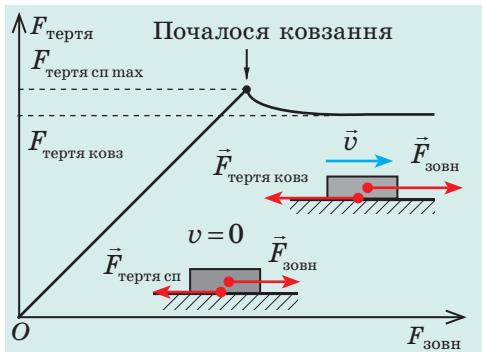


Рис. 13.4. Зовнішні сили намагаються зрушити тіло. Сила тертя спокою, яка при цьому виникає, зрівноважує зовнішні сили, і тіло перебуває в стані спокою



Рис. 13.5. Шини автомобіля в момент дотику з поверхнею дороги намагаються, по суті, здійснити рух назад. У результаті виникає сила тертя спокою, направлена вперед, — рушійна сила



**Рис. 13.6.** Коли сила тертя спокою сягає максимального значення, тіло рушає з місця (починає ковзання)

У техніці, на транспорті, в побуті часто вживають заходів для збільшення максимальної сили тертя спокою. Так, на сходинки або взуття наклеюють антиковзні накладки, узимку автомобілі «перевзувають» у зимові шини.

💡 Наведіть ще кілька подібних прикладів.

Після того як рівнодійна зовнішніх сил зрівняється з максимальною силою тертя спокою, тіло починає ковзання, — і тоді говорять про **силу тертя ковзання**.

**Сила тертя ковзання**  $\vec{F}_{\text{тертя ковз}}$  — це сила, яка виникає в разі ковзання одного тіла по поверхні іншого і направлена протилежно напрямку відносної швидкості руху тіл.

Сила тертя ковзання діє вздовж поверхні дотику тіл і трохи менша від максимальної сили тертя спокою (рис. 13.6). Саме тому тіла починають рухатися з місця ривком і зрушити їх важче, ніж потім рухати. Це особливо помітно, коли тіла є масивними.

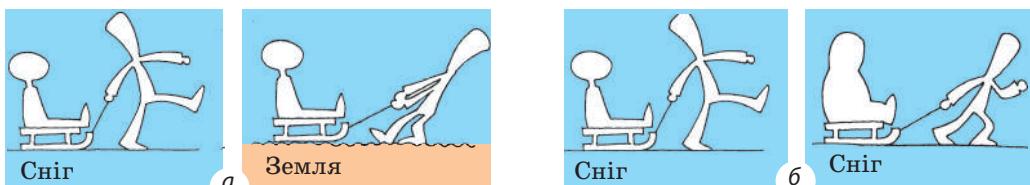
Ваш життєвий досвід свідчить, що сила тертя ковзання залежить від властивостей дотичних поверхонь тіл і збільшується зі збільшенням сили нормальної реакції опори (рис. 13.7). Закон, що відбиває залежність  $F_{\text{тертя ковз}}$  ( $N$ ), експериментально встановлений французьким ученим *Г. Амонтоном* (1663–1705) і перевірений його співвітчизником *Ш. Кулоном* (1736–1806), тому має назву **закон Амонтона — Кулона**:

Сила тертя ковзання не залежить від площині дотику тіл і прямо пропорційна силі  $N$  нормальної реакції опори:

$$F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$$

Тут  $\mu$  — **коєфіцієнт тертя ковзання**, який залежить від матеріалів і якості обробки дотичних поверхонь, незначно залежить від відносної швидкості руху дотичних поверхонь і є безрозмірною величиною:

$$\mu = \frac{F_{\text{тертя ковз}}}{N}; [\mu] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Н}} = 1.$$



**Рис. 13.7.** Сила тертя ковзання залежить від якості та роду поверхонь (а) і збільшується зі збільшенням сили нормальної реакції опори (б)

Значення коефіцієнтів тертя ковзання встановлюють виключно експериментально. Зазвичай таблиці коефіцієнтів тертя ковзання містять орієнтовні середні значення для пар матеріалів (див. [таблицю](#)).

Силу тертя ковзання можна зменшити, змастивши дотичні поверхні. Тверде змащення змінює якість поверхні; рідке змащення віддаляє дотичні поверхні одну від одної — сухе тертя замінюється значно слабшим рідким тертям.

Тертя істотно зменшиться, якщо між дотичними поверхнями розташувати тверді котки, тобто ковзання замінити коченням. Досліди показують, що *за однакових умов сила тертя кочення в десятки разів менша, ніж сила тертя ковзання*.

Одна з причин виникнення сили тертя кочення полягає в тому, що поверхня, по якій рухається кулясте тіло (циліндр, колесо, куля), деформується, тому тіло весь час немов закочується на невелику похилу площину (рис. 13.8). Чим більша деформація поверхні, тим більший кут нахилу площини і тим більшою є сила тертя кочення. Саме тому *сила тертя кочення*:

- зменшується зі збільшенням твердості поверхні, якою котиться тіло, та твердості матеріалу, з якого виготовлене тіло;
- збільшується зі збільшенням тиску тіла на поверхню;
- зменшується зі збільшенням радіуса тіла.

#### 4

### Від чого залежить сила опору середовища

**Сила опору середовища (сила в'язкого тертя)**  $\vec{F}_{\text{оп}}$  — сила, яка виникає під час руху тіла всередині рідкого або газоподібного середовища.

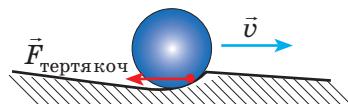
Розглянемо кілька причин виникнення в'язкого тертя.

1. *Ламінарне обтікання*. Якщо тверде тіло рухається всередині рідини або газу, то прилеглі шари середовища рухаються разом із тілом (рис. 13.9). Чим більшою є в'язкість середовища, тим більше його шарів залучаються до руху.

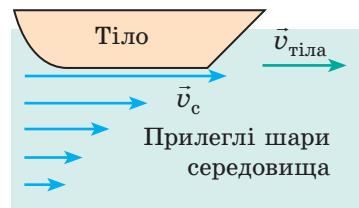
2. *Лобовий опір*. Частинки середовища зіштовхуються з тілом і сповільнюють його рух.

3. *Вихрове обтікання*. Якщо тіло рухається з великою швидкістю, то ламінарне обтікання переходить у вихрове: безпосередньо за тілом

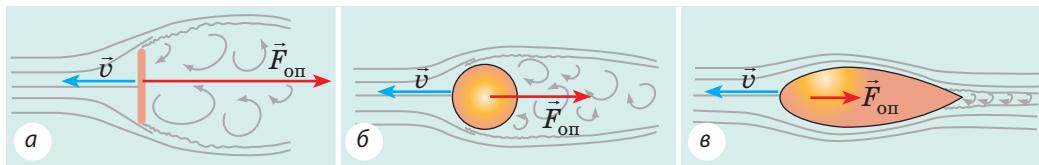
Матеріали	Коефіцієнт тертя ковзання
Сталь по льоду	0,02
Сталь по сталі	0,15
Бронза по бронзі	0,20
Дерево по дереву	0,25
Папір (картон) по дереву	0,40
Гума по бетону	0,75



**Рис. 13.8.** Поверхня, якою котиться тіло, деформується, і це є однією з причин виникнення сили тертя кочення



**Рис. 13.9.** Швидкість руху прилеглих до тіла шарів середовища ( $v_c$ ) у міру віддалення від тіла поступово зменшується до нуля



**Рис. 13.10.** За однакових умов найбільша сила опору діє на шайбу (а), найменша — на тіло краплеподібної (обтічної) форми (в)

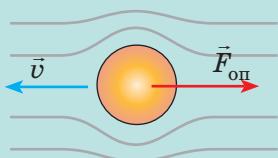
утворюється зона зменшеного тиску, і тіло ніби втягується в цю зону, сповільнюючи свій рух.

Сила опору середовища суттєво залежить від форми тіла (рис. 13.10).

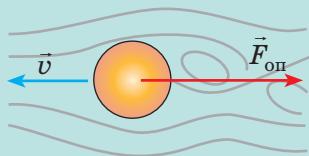
*Сила опору середовища збільшується:*

1) зі збільшенням швидкості  $v$  руху тіла; при цьому:

- якщо  $v < v_k$ , то  $F_{\text{оп}} \sim v$



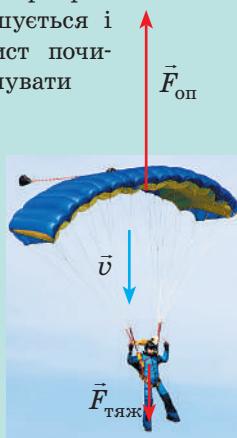
- якщо  $v > v_k$ , то  $F_{\text{оп}} \sim v^2$



$v_k$  — критична швидкість — швидкість руху тіла, за якої ламінарне обтікання перетворюється на вихрове

2) зі збільшенням площини по-перечного перерізу тіла.

Наприклад, під час падіння парашутист набирає значну швидкість, проте відразу після розкриття парашута сила опору повітря різко збільшується і парашутист починає гальмувати



3) зі збільшенням густини та в'язкості середовища, за певних змін якості поверхні:

- збільшення густини середовища збільшує лобовий опір;
- збільшення в'язкості середовища та певні нерівності поверхні тіла сприяють залученню до руху більше прилеглих шарів середовища



**Рис. 13.11.** До завдання в § 13



Акули, дельфіни, риби можуть рухатися досить швидко. Які особливості конфігурації їхньої голови, особливості форми і поверхні їхніх тіл цьому сприяють?

*Зверніть увагу! Не існує сили рідкого тертя спокою.* Тобто якщо тіло, розташоване в рідкому або газоподібному середовищі, перебуває в стані спокою відносно середовища, то сила опору середовища на нього не діє.



А чому ж тоді можуть ширятися лелеки, піанери, навіть білки (рис. 13.11)? Яка сила компенсує силу тяжіння?

## 5

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** На горизонтальній дорозі автомобіль має зробити поворот радіуса 45 м. Яку найбільшу швидкість може мати автомобіль, щоб «вписатись» у цей поворот? Вважайте, що коефіцієнт тертя ковзання шин об асфальт  $\mu = 0,5$ .

**Аналіз фізичної проблеми.** Автомобіль «не впишеться» в поворот, якщо  $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$ , напрямлена до центра кола, сягне максимального значення й «перейде» в силу тертя ковзання. Будемо вважати, що  $F_{\text{тертя сп max}} = \mu N$ .

**Зверніть увагу:** крім сили тертя спокою, яка напрямлена до центра кола та запобігає бічному ковзанню автомобіля, існує ще сила тертя спокою, яка запобігає прослизанню коліс уздовж напрямку руху автомобіля та власне є силою тяги автомобіля (рис. 13.12).

Виконаємо пояснювальний рисунок, позначивши на ньому сили, що діють на автомобіль, і напрямок прискорення руху автомобіля. Систему координат пов'яжемо з тілом на поверхні Землі.

Дано:

$r = 45$  м

$\mu = 0,5$

$g = 10$  м/с<sup>2</sup>

$v_{\text{max}} = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання. Запишемо другий закон Ньютона у векторному вигляді:

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{оп}} + \vec{F}_{\text{тертя сп}} = m\vec{a}_{\text{дц}}.$$

Спроектуємо рівняння на осі координат:

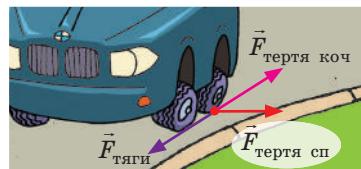
$$\begin{cases} OX: F_{\text{тертя сп}} = ma_{\text{дц}}, \\ OY: N - mg = 0, \\ OZ: F_{\text{тяги}} - F_{\text{оп}} = 0. \end{cases}$$

Оскільки  $F_{\text{тертя сп max}} = \mu N = \mu mg$ ;  $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}$ , то маємо:  $\mu mg = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\mu gr}$ .

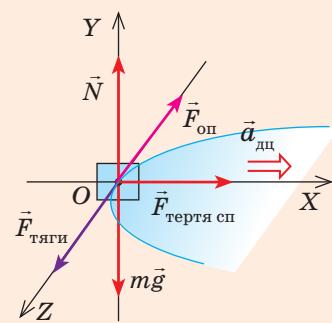
Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{m/c^2 \cdot m} = m/c; v = \sqrt{0,5 \cdot 45 \cdot 10} = 15 \text{ (м/с)}.$$

Відповідь:  $v_{\text{max}} = 15$  м/с.



**Рис. 13.12.** Сили тертя, які діють на ведуче колесо автомобіля під час повороту



### Підбиваємо підсумки

- Сила тертя — це сила, яка виникає під час руху або спроби руху одного тіла по поверхні іншого, а також під час руху тіла всередині рідкого чи газоподібного середовища. Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхонь дотичних тіл і протилежно швидкості їх відносного руху.

- Розрізняють сили тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення та опору середовища. Усі ці сили, крім сили тертя кочення, мають електромагнітну природу, оскільки зумовлені міжмолекулярною взаємодією.

- Сила тертя спокою дорівнює за модулем і протилежна за напрямком рівнодійній зовнішніх сил, що діють на тілі:  $\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн.}}$

- ♦ Сила тертя ковзання прямо пропорційна силі нормальної реакції опори:  $F_{\text{тертяковз}} = \mu N$ , де  $\mu$  — коефіцієнт тертя ковзання, що залежить від матеріалів дотичних поверхонь і якості обробки дотичних поверхонь.
- ♦ Сила тертя кочення прямо пропорційна силі нормальної реакції опори, набагато менша за силу тертя ковзання, залежить від радіуса тіла та матеріалу дотичних поверхонь.
- ♦ Сила опору середовища суттєво залежить від форми тіла, збільшується зі збільшенням швидкості руху тіла, площі його поперечного перерізу, а також зі збільшенням в'язкості та густини середовища.

### Контрольні запитання



1. Дайте означення сили тертя.
2. Які види тертя ви знаєте?
3. Якими є причини виникнення сухого тертя? рідкого тертя?
4. Чому силу тертя спокою називають рушійною силою?
5. Дайте означення сили тертя ковзання. Як вона направлена і за якою формулою її обчислюють?
6. Як можна зменшити (збільшити) силу тертя? Наведіть приклади.
7. Від яких факторів залежить сила опору середовища? Наведіть приклади.

### Вправа № 13

1. Чому небезпечно їхати автомобілем по мокрій або зледенілій дорозі?
2. Чому, якщо машина забуксувала, то під колеса підкладають колоди?
3. Чому спринтерські дистанції долають у шипованому взутті, а стаєрські — у м'якому?
4. Обчисліть гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, якщо він рухався по прямій горизонтальній ділянці дороги й перед гальмуванням мав швидкість 72 км/год. Коефіцієнт тертя ковзання гуми по бетону 0,8.
5. Запряг собак починає тягти з незмінною силою 150 Н санки масою 100 кг. За який проміжок часу санки проїдуть перші 200 м шляху? Вважайте, що коефіцієнт тертя ковзання полозів по снігу дорівнює 0,05.
6. Робітник штовхає вагонетку із силою, направленою вниз під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Яку найменшу силу має приклади робітник, щоб зрушити вагонетку з місця, якщо її маса 300 кг, а коефіцієнт опору 0,01\*? Вагонетка стойть горизонтально.
7. Наведіть приклади сучасних механізмів, апаратів, пристосувань, швидкісних транспортних засобів, створюючи які, конструктори «підгледіли» в природі способи збільшення або зменшення сил тертя та опору середовищ. У разі необхідності скористайтесь додатковими джерелами інформації.

### Експериментальне завдання



Скориставшись підручними засобами (гумовий шнур, тіла різних форм, пилосос, клаптик картону, посудина з водою, металева кулька та ін.), проведіть низку простих дослідів (див., наприклад, рисунок) щодо виявлення факторів, від яких залежить опір середовища (або сила тертя ковзання чи кочення). Опишіть ці досліди або підготуйте відеозвіт.



\* Нагадуємо: в подібних задачах коефіцієнт опору рухові ( $\mu$ ) враховує всі види тертя: тертя кочення коліс, тертя ковзання в осіах тощо. У таких випадках сила опору  $\bar{F}_{\text{оп}}$  обчислюється за формулою  $F_{\text{оп}} = \mu N$ , де  $\mu$  — коефіцієнт опору.

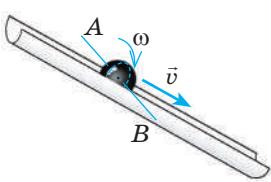


Уявіть, що вам потрібно взяти книжку на верхній полиці. Підставивши стілець, ви стаєте на нього навшпиньки і... не втримуєте рівноваги. А от неваляйка з дивовижним завзяттям повертається у вертикальне положення і ніколи не втрачає рівноваги! Що таке рівновага і за яких умов реальне тіло (а не його модель — матеріальна точка) перебуває в рівновазі?



### 1 Що таке рівновага тіла

**Рівновага тіла** — це збереження стану руху або стану спокою тіла з пливом часу. Що означає *збереження стану руху*? Щоб це з'ясувати, дамо означення *поступального та обертовального рухів*.

Поступальний рух	Обертовальний рух
Рух тіла, за якого всі точки тіла рухаються однаково.	Рух тіла, за якого всі точки тіла рухаються по колах, центри яких розташовані на одній прямій лінії — на <i>осі обертання</i> .
	<p>Рух кульки, яка скочується похилим жолобом, є <i>складним</i> — його можна розкласти на <i>два прості рухи</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>обертовальний</i> відносно осі <i>AB</i> із деякою кутовою швидкістю <math>\omega</math>;</li> <li>• <i>поступальний</i> зі швидкістю <math>\vec{v}</math>, яка дорівнює швидкості руху точок кульки, що лежать на осі <i>AB</i>.</li> </ul>

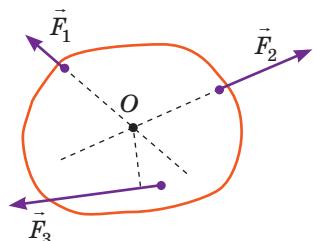
Кулька *зберігатиме стан руху — перебуватиме в рівновазі*, якщо швидкості її поступального та обертовального рухів залишатимуться *незмінними*.

### 2 Центр мас тіла

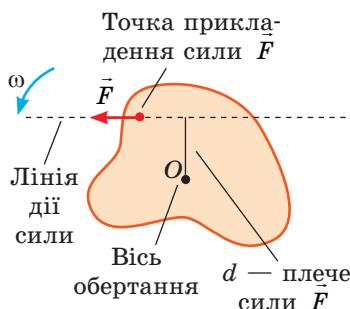
Якщо до нерухомого тіла прикласти деяку силу, то зазвичай тіло почне повертатися й одночасно рухатися поступально. Але через деякий час обертовальний рух тіла припиниться і тіло почне рухатися тільки поступально. Це відбудеться тоді, коли лінія дії сили пройде через *центр мас тіла*.

**Центр мас тіла** — це точка перетину прямих, уздовж яких напрямлені сили, кожна з яких спричиняє тільки поступальний рух тіла (рис. 14.1).

Якщо розміри тіла набагато менші від радіуса Землі, то *центр мас тіла* збігається з *центром тяжіння*. Нагадаємо: *центр тяжіння симетричних фігур розташований у їх геометричному центрі*; *центр тяжіння трикутника — у точці перетину його медіан*.



**Рис. 14.1.** Сили  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  спричиняють тільки поступальний рух тіла, адже лінії дії цих сил проходять через центр мас тіла (точка  $O$ ); сила  $\vec{F}_3$  крім поступального спричиняє також обертовальний рух тіла



**Рис. 14.2.** Тіло обертається проти ходу годинникової стрілки — відносно осі, що проходить через точку  $O$

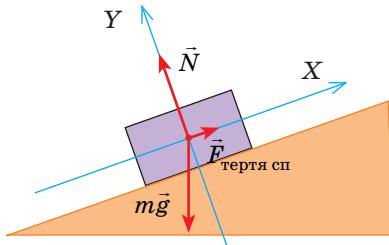
Зображення на рис. 14.2 сила  $\vec{F}$  обертає тіло проти ходу годинникової стрілки — момент такої сили прийнято вважати додатним. Якщо сила обертає (або намагається обертати) тіло за ходом годинникової стрілки, то момент такої сили вважають від'ємним. Зазвичай на тілі діють кілька сил, моменти яких можуть бути як додатними, так і від'ємними, а можуть дорівнювати нулю.

### 3 За яких умов тіло перебуває в рівновазі

- Якщо тіло може рухатися тільки поступально (не може обертатися), то відповідно до закону інерції таке тіло перебуває в рівновазі, якщо рівнодійна сила, прикладена до тіла, дорівнює нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$$

*Приклад.* Розташоване на похилій площині тіло перебуває у стані рівноваги, якщо сили, що діють на нього, скомпенсовані:  $\vec{F}_{\text{тертя}} + \vec{N} + m\vec{g} = 0$ .



- Якщо тіло може рухатися поступально, а також обертатися навколо деякої осі, то це тіло перебуватиме в рівновазі, якщо дотримано обох умов рівноваги:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ ;  $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$

Про деякі методи визначення центра мас пласких фігур неправильної геометричної форми ви дізнаєтесь в ході лабораторної роботи № 4.

### 3 Згадуємо момент сили

**Момент сили  $M$**  — це фізична величина, що дорівнює добутку модуля сили  $F$ , яка діє на тіло, на плече  $d$  цієї сили:

$$M = Fd$$

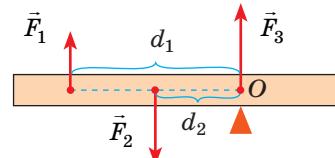
Одиниця моменту сили в СІ — **ньютоно-метр**:  $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} (\text{Nm})$ .

Плече  $d$  сили  $F$  — це найменша відстань від осі обертання тіла до лінії, вздовж якої діє сила  $\vec{F}$  (рис. 14.2).

- Якщо тіло може тільки обертатися (має нерухому вісь обертання), то відповідно до правила моментів таке тіло перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів сил, що діють на тіло, дорівнює нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$$

*Приклад.* Важіль перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, що діють на нього, дорівнює нулю:  $M_1 + M_2 + M_3 = 0$ , де  $M_1 = -F_1 d_1$ ,  $M_2 = F_2 d_2$  (сила  $\vec{F}_1$  повертає важіль за ходом годинникової стрілки, сила  $\vec{F}_2$  — проти ходу годинникової стрілки);  $M_3 = 0$  (оскільки  $d_3 = 0$ ).



## 4

## Види рівноваги

Розрізняють три види рівноваги тіл: *стійка рівновага*, *нестійка рівновага*, *байдужа рівновага*.

Стійка рівновага	Нестійка рівновага	Байдужа рівновага
У разі малих відхилень від положення рівноваги тіло довільно повертається в початкове положення	У разі малих відхилень від положення рівноваги тіло ще більше відхиляється від початкового положення	У разі малих відхилень від положення рівноваги тіло залишається у своєму новому положенні
Рівнодійна напрямлена до положення рівноваги	Рівнодійна напрямлена від положення рівноваги	Рівнодійна дорівнює нулю
Сили скомпенсовані, але момент сили $m\vec{g}$ повертає тіло до положення рівноваги	Сили скомпенсовані, але момент сили $m\vec{g}$ ще більше відхиляє тіло	Сили скомпенсовані, сума моментів цих сил дорівнює нулю

*Зверніть увагу!* Тіло, що має нерухому вісь обертання, перебуватиме в стані *стійкої рівноваги*, якщо центр тяжіння тіла розташований нижче від точки опори або підвісу.

На практиці ми часто маємо справу з випадками рівноваги тіл, які спираються на кілька точок або на поверхню: людина спирається на ноги, стіл і стілець — на ніжки, автомобіль — на колеса, будинок — на фундамент і т. д. (див., наприклад, рис. 14.3).

*Тіло, яке спирається на горизонтальну площину, перебуває у стані*

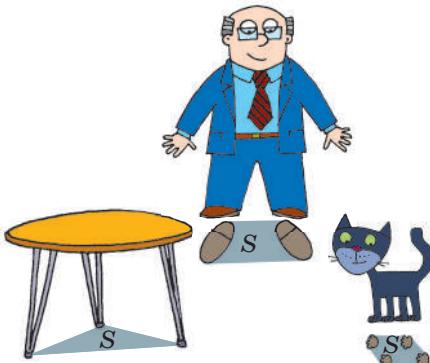
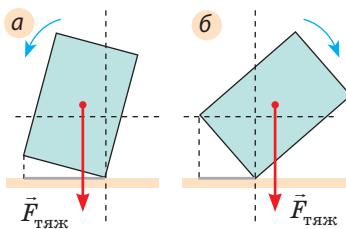


Рис. 14.3. Площа опори деяких об'єктів (позначена S)



**Рис. 14.4.** Якщо лінія дії сили тяжіння проходить у межах площини опори, рівновага стійка (а), якщо поза площину опори, рівновага тіла порушується — тіло падає (б)

стійкої рівноваги, якщо вертикальна лінія, проведена через центр тяжіння тіла, проходить у межах площини опори (рис. 14.3, 14.4, а).

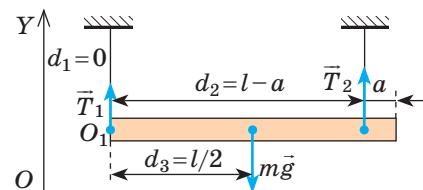
Є очевидним: чим нижче розташований центр тяжіння тіла і чим більша площа опори тіла, тим стійкішим буде це тіло. Саме тому фундаменти верстатів роблять широкими та масивними, швидкісні боліди мають дуже низьку посадку, людина і тварина, щоб набути стійкого положення, розставляють і трохи згинають ноги (лапи). Щоб збільшити площину опори, літня людина під час ходьби використовує палицю.

## 5

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Однорідну рейку завдовжки  $l = 10$  м і масою 900 кг піднімають на двох паралельних тросах. Визначте сили натягу тросів, якщо один закріплений на кінці рейки, а другий — на відстані  $a = 1$  м від іншого кінця рейки.

**Аналіз фізичної проблеми.** Виконаємо пояснювальний рисунок, де позначимо сили, що діють на рейку (сили  $\vec{T}_1$  і  $\vec{T}_2$  натягу тросів і силу тяжіння  $m\vec{g}$ ). Оберемо за вісь обертання вісь, яка проходить, наприклад, через точку  $O_1$  (цю точку можна обирати довільно), та позначимо плечі сил:  $d_1 = 0$ ,  $d_2 = l - a$ ,  $d_3 = l/2$ .



**Дано:**  
 $l = 10$  м  
 $m = 900$  кг  
 $a = 1$  м

$T_1$  — ?  
 $T_2$  — ?

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Запишемо дві умови рівноваги тіла:  $\begin{cases} \vec{T}_1 + \vec{T}_2 + m\vec{g} = 0, \\ M_1 + M_2 + M_3 = 0. \end{cases}$

Тут  $M_1 = 0$ , оскільки  $d_1 = 0$ ;  $M_2 = T_2(l - a)$  — сила  $\vec{T}_2$  намагається повернути рейку проти ходу годинникової стрілки;  $M_3 = -mgl/2$  — сила тяжіння намагається повернути рейку за ходом годинникової стрілки.

Спроектуємо перше рівняння на вісь  $OY$ , підставимо вирази для моментів сил і отримаємо систему лінійних рівнянь:  $\begin{cases} T_1 + T_2 - mg = 0, \\ T_2(l - a) - mgl/2 = 0. \end{cases}$

Знайдемо  $T_2$  із другого рівняння системи:  $T_2(l - a) = \frac{mgl}{2} \Rightarrow T_2 = \frac{mgl}{2(l - a)}$ .

Знайдемо  $T_1$  із першого рівняння системи:  $T_1 = mg - T_2$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканих величин:

$$[T_2] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{Н}; T_2 = \frac{900 \cdot 10 \cdot 10}{2 \cdot (10 - 1)} = 5000 \text{ (Н)}.$$

$$[T_1] = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 - \text{Н} = \text{Н}; T_1 = 900 \cdot 10 - 5000 = 4000 \text{ (Н)}.$$

**Аналіз результатів.** Перший трос діє на рейку з меншою силою, оскільки ця сила прикладена далі від центра тяжіння тіла. Результат реальний.

**Відповідь:**  $T_1 = 4 \text{ кН}$ ;  $T_2 = 5 \text{ кН}$ .



## Підбиваємо підсумки

- Рівновага тіла — це збереження стану руху або спокою тіла з плином часу. Збереження стану руху означає, що швидкості поступального та обертового рухів тіла залишаються незмінними.
- Тіло перебуватиме в рівновазі, якщо дотримано двох умов рівноваги:
  - 1) рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю:  $F_1 + F_2 + \dots + F_n = 0$ ;
  - 2) сума моментів усіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю:  $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$ .
- Розрізняють стійку, нестійку, байдужу рівноваги тіл. Незначно відхилене від положення, рівноваги тіло в разі стійкої рівноваги повертається у вихідне положення; в разі нестійкої — ще більше відхиляється від вихідного положення, в разі байдужої — залишається у своєму новому положенні.

## Контрольні запитання



1. Що називають рівновагою тіла?
2. Дайте означення центра мас.
3. Охарактеризуйте момент сили як фізичну величину.
4. За яких умов тіло перебуває в рівновазі?
5. Яку рівновагу тіл називають стійкою? нестійкою? байдужою?
6. Коли тіло, що спирається на горизонтальну площину, перебуває у стані стійкої рівноваги?



## Вправа № 14

1. У положенні якої рівноваги перебувають тіла на рис. 1?
2. Коли людина несе важкий вантаж на спині, то нахиляється вперед, а коли несе вантаж перед собою, відхиляється назад. Чому?
3. Чому в разі значного нахилу судно може перевернутися (рис. 2)? Де краще розташувати вантаж (у трюмі чи на палубі), щоб судно було більш стійким?

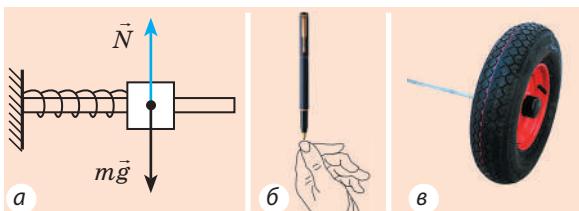


Рис. 1

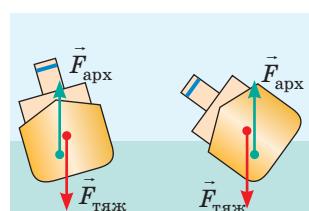


Рис. 2

4. Дошка масою 10 кг підперта на відстані  $1/4$  її довжини. Яку силу перпендикулярно до дошки потрібно прикласти до її короткого кінця, щоб утримати дошку в горизонтальному положенні?
5. Драбина спирається на гладеньку вертикальну стіну. Коефіцієнт тертя між ніжками драбини і підлогою 0,4. Який найбільший кут може утворити драбина зі стіною? Центр тяжіння драбини розташований посередині драбини.
6. Чому лавка перевернулася (рис. 3)? Складіть задачу, задайте масу тіл. Якою повинна бути маса професора, щоб лавка залишилася нерухомою?



Рис. 3



### Експериментальне завдання

Зчепивши дві виделки, закріпіть їх на одному кінці сірника, а другий кінець сірника розташуйте на вістрі циркуля, як показано на рис. 4. Поясніть, чому виделки не падають. Скориставшись додатковими джерелами інформації, знайдіть ще кілька цікавих дослідів на рівновагу тіл і виконайте їх.



Рис. 4

## § 15. МЕХАНІЧНА РОБОТА. КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ. ПОТУЖНІСТЬ



Щоб механічний годинник ішов, його потрібно завести — закрутити пружину; розкручуючись, пружина виконає роботу.

Піднявшись на вершину гори, лижник теж створює «запас роботи» і в результаті отримує можливість скотитися вниз; при цьому роботу виконуватиме сила тяжіння.

Найпростіший спосіб розбити вікно в охопленому полум'ям будинку — кинути у вікно камінь. Якщо швидкість руху каменя достатня, він розіб'є вікно — виконає роботу.

Про тіло або систему тіл, які можуть виконати роботу, кажуть, що вони мають енергію. Про механічну енергію та механічну роботу йтиметься в цьому параграфі.

### 1 Коли сила виконує механічну роботу

Основним завданням механіки є визначення механічного стану тіла (координат і швидкості руху) в будь-який момент часу. Механічний стан тіла не змінюється сам по собі — необхідна взаємодія, тобто наявність сили. Коли тіло переміщується (змінює свій механічний стан) під дією сили, то кажуть, що ця сила виконує *механічну роботу*.

**Механічна робота (робота сили)  $A$**  — це фізична величина, яка характеризує зміну механічного стану тіла й дорівнює добутку модуля сили  $F$ , модуля переміщення  $s$  і косинуса кута  $\alpha$  між вектором сили та вектором переміщення:

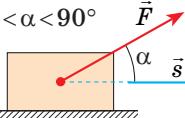
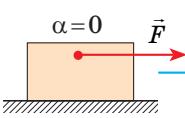
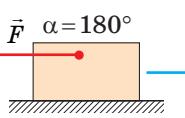
$$A = F s \cos \alpha$$

*Одиниця роботи в СІ — джоуль:*

$$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}).$$

1 Дж дорівнює механічній роботі, яку виконує сила 1 Н, переміщуючи тіло на 1 м у напрямку дії цієї сили.

Робота сили, що діє на тіло, є величиною скалярною, але вона може бути додатною, від'ємною або дорівнювати нулю — залежно від того, куди напрямлена сила відносно напрямку руху тіла (див. таблицю на с. 93).

Робота додатна $A > 0$	Робота від'ємна $A < 0$	Робота дорівнює нулю $A = 0$
$0 < \alpha < 90^\circ$ 	$\alpha = 0$ 	$\alpha = 180^\circ$ 
$A = F s \cos \alpha$ , $\cos \alpha > 0$	$A = F s$ , $\cos \alpha = 1$	$A = -F s$ , $\cos \alpha = -1$

Поміркуйте, при яких ще кутах  $\alpha$ , не зазначеніх у таблиці, робота сили буде від'ємною. У яких ще випадках робота сили дорівнюватиме нулю?

## 2 Яким є геометричний зміст роботи сили

Розглянемо силу, що діє під деяким кутом  $\alpha$  до напрямку руху тіла. Знайдемо проекцію цієї сили на напрямок переміщення тіла, для чого вісь  $OX$  спрямуємо в бік руху тіла (рис. 15.1, а). Із рисунка бачимо, що  $F_x = F \cos \alpha$ , отже,  $A = F_x s$ .

Побудуємо *графік*  $F_x(s)$  — *залежності проекції сили від модуля переміщення*. Якщо сила, яка діє на тіло, є незмінною, графік цієї залежності являє собою відрізок прямої, паралельної осі переміщення (рис. 15.1, б). Із рисунка видно, що добуток  $F_x$  і  $s$  відповідає площі  $S$  прямокутника під графіком. У цьому полягає *геометричний зміст роботи сили*: *робота сили чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності проекції сили від модуля переміщення*.

Це твердження поширюється й на випадки, коли сила змінюється (рис. 15.1, в, г).

## 3 Коли тіло має кінетичну енергію

Розглянемо тіло масою  $m$ , яке під дією рівнодійної сили  $\vec{F}$  збільшує швидкість свого руху від  $v_0$  до  $v$ . Нехай рівнодійна  $\vec{F}$  не змінюється з часом і направлена в бік руху тіла. Визначимо роботу цієї сили.

- За означенням роботи:  $A = F s \cos \alpha$ .

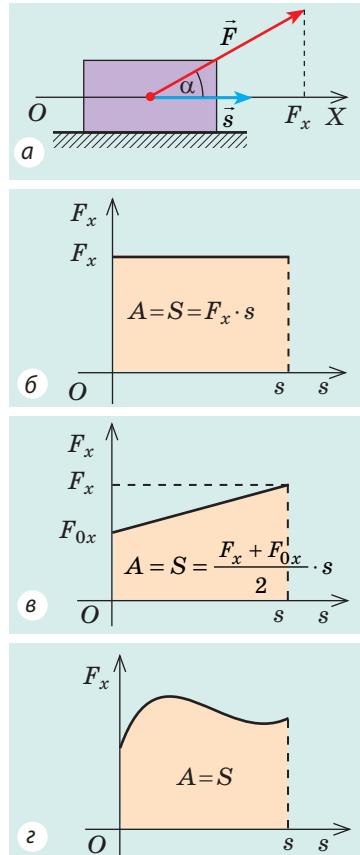
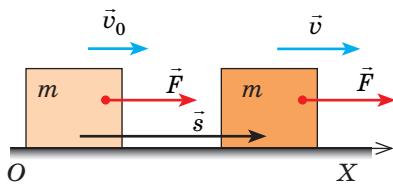


Рис. 15.1. Якщо напрямок осі  $OX$  збігається з напрямком руху тіла, то робота  $A$  сили чисельно дорівнює площі  $S$  фігури під графіком залежності  $F_x(s)$



**Рис. 15.2.** До виведення теореми про кінетичну енергію

- Сила діє в напрямку руху тіла ( $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{s}$ ), тому кут  $\alpha$  у цьому випадку дорівнює нулю, тобто  $\cos \alpha = 1$  (рис. 15.2).

- Оскільки сила  $\vec{F}$  є незмінною і напрямлена в бік руху тіла, то тіло рухається рівноприскорено прямолінійно, тому  $s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$ .

- Відповідно до другого закону Ньютона:  $F = ma$ .

Підставивши вирази для  $F$ ,  $s$  і  $\cos \alpha$  у формулу роботи, отримуємо:

$$A = ma \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2}, \text{ або } A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

Величину  $\frac{mv^2}{2}$  позначають символом  $E_k$  і називають *кінетичною енергією тіла*.

**Кінетична енергія** — це фізична величина, яка характеризує механічний стан рухомого тіла і дорівнює половині добутку маси  $m$  тіла на квадрат швидкості  $v$  його руху:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

**Теорема про кінетичну енергію:** робота рівнодійної всіх сил, які діють на тіло, дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:

$$A = E_k - E_{k0} = \Delta E_k$$

Якщо в початковий момент часу тіло є нерухомим ( $v_0 = 0$ ), тобто  $E_{k0} = 0$ , то теорема про кінетичну енергію зводиться до рівності:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

*Кінетична енергія тіла, що рухається зі швидкістю  $v$ , дорівнює роботі, яку виконує сила для того, щоб надати нерухомому тілу даної швидкості.*

Яку роботу виконала над вами сила тяжіння, якщо, стрибнувши зі сходинки, ви досягли швидкості 3 м/с?

#### 4 Згадуємо про потужність

Зверніть увагу! Дотепер ми говорили про роботу сили. Але будь-яка сила характеризує дію певного тіла (або поля). Тому роботу сили часто називають роботою тіла (роботою поля), з боку якого діє ця сила. На практиці

\* За цією формулою визначають *кінетичну енергію поступального руху тіла*. Якщо тіло ще й обертається, то крім кінетичної енергії поступального руху воно також має *кінетичну енергію обертовального руху*.

велике значення має не тільки виконана робота, але й час, за який цю роботу виконано. Тому для характеристики механізмів, призначених для виконання роботи, використовують поняття *потужності*.

**Потужність**  $P$  (або  $N$ ) — це фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи й дорівнює відношенню роботи  $A$  до інтервалу часу  $t$ , за який цю роботу виконано:

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

Одиниця потужності в СІ — ват:

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \quad \left( 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} \right).$$

(Названа на честь Джеймса Ватта (1736–1819). Як одиницю потужності він ввів *кінську силу*, яку іноді використовують і зараз: 1 к. с. = 746 Вт.)

Потужність, яку розвиває транспортний засіб, зручно визначати через силу тяги та швидкість руху. Якщо в даний інтервал часу тіло рухається рівномірно, а напрямок сили тяги збігається з напрямком переміщення, то тягову потужність двигуна можна обчислити за формулою:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = Fv.$$

Ця формула спрощується й у випадку нерівномірного руху: *потужність, яку розвиває двигун у даний момент часу, дорівнює добутку модуля сили тяги двигуна на модуль його миттєвої швидкості*:  $P = Fv$  (рис. 15.3).



**Рис. 15.3.** Коли для руху автомобіля потрібна більша сила тяги, водій переходить на меншу швидкість або натискає на газ, збільшуючи таким чином потужність двигуна

## 5

### Учимося розв'язувати задачі

Щоб визначити механічну роботу й потужність, потрібно знати *силу*, яка діє на тіло, *переміщення* тіла та *час* його руху. Тому зазвичай розв'язання задач на визначення роботи й потужності зводиться до розв'язання задач із кінематики та динаміки.

**Задача.** Автомобіль масою 2 т рухається рівномірно зі швидкістю 20 м/с горизонтальною ділянкою дороги. Які сили діють на автомобіль? Визначте роботу кожної сили та тягову потужність двигуна автомобіля, якщо коефіцієнт опору рухові дорівнює 0,01, а час руху — 50 с.

Дано:

$m = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$

$v = 20 \text{ м/с}$

$\mu = 0,01$

$t = 50 \text{ с}$

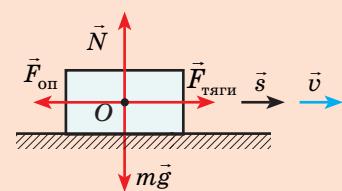
$A = ?$

$P = ?$

**Розв'язання.** Виконаємо пояснівальний рисунок, на якому позначимо сили, що діють на автомобіль: силу тяжіння  $m\vec{g}$ , силу тяги  $\vec{F}_{\text{тяги}}$ , силу опору рухові  $\vec{F}_{\text{оп}}$ , силу  $\vec{N}$  нормальнюю реакції опори.

За означенням роботи:

$$A = Fscos\alpha.$$



Щоб визначити роботу кожної сили, слід знайти:

- кут між напрямком цієї сили та напрямком переміщення;
- модуль сили та модуль переміщення.

1. Автомобіль рухається рівномірно, тому сили, які діють на автомобіль, скомпенсовані:

- сила тяжіння зрівноважена силою нормальнюю реакцією опори:  $N = mg$ ;
- сила тяги зрівноважена силою опору рухові:  $F_{\text{тяги}} = F_{\text{оп}} = \mu N$ .

2. Переміщення автомобіля під час прямолінійного рівномірного руху можна знайти за формулою:  $s = vt$ .

3. Сила тяжіння та сила нормальнюю реакцією опори перпендикулярні напрямку руху автомобіля ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ ). Отже, робота цих сил дорівнює нулю.

Сила тяги напрямлена в бік руху тіла. Оскільки  $\alpha = 0$ , то  $\cos \alpha = 1$ , тому

$$A(F_{\text{тяги}}) = F_{\text{тяги}} s = \mu mgvt.$$

Сила опору протилежна напрямку руху тіла:  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos \alpha = -1$ , тому

$$A(F_{\text{оп}}) = -F_{\text{оп}} s = -\mu mgvt.$$

4. Тягову потужність двигуна автомобіля визначимо за формулою  $P = \frac{A(F_{\text{тяги}})}{t}$ .

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[A] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж} ; [P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

$$A(F_{\text{тяги}}) = 0,01 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 50 = 200 \cdot 10^3 \text{ (Дж)}; A(F_{\text{оп}}) = -200 \text{ кДж};$$

$$P = \frac{200 \cdot 10^3}{50} = 4 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}.$$

Відповідь:  $A(F_{\text{тяж}}) = 0$ ;  $A(N) = 0$ ;  $A(mg) = 0$ ;  $A(F_{\text{тяги}}) = 200 \text{ кДж}$ ;  $A(F_{\text{оп}}) = -200 \text{ кДж}$ ;  $P = 4 \text{ кВт}$ .



## Підбиваємо підсумки

- Робота сили — це фізична величина, яка характеризує зміну механічного стану тіла та обчислюється за формулою:  $A = Fsc \cos \alpha$ . Одиниця роботи в СІ — джоуль:  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .
- Робота рівнодійної всіх сил, які діють на тіло, дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:  $A = E_k - E_{k0} = \Delta E_k$ .
- Кінетична енергія — це фізична величина, яка характеризує механічний стан рухомого тіла і дорівнює половині добутку маси  $m$  тіла на квадрат швидкості  $v$  його руху:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .
- Потужність  $P$  (або  $N$ ) — це фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи й дорівнює відношенню роботи  $A$  до інтервалу часу  $t$ , за який вона виконана:  $P = \frac{A}{t}$ . Потужність можна також обчислити за формулою:  $P = Fv$ .



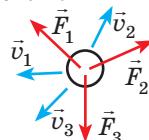
## Контрольні запитання

1. Дайте означення механічної роботи. Яка її одиниця в СІ? 2. У яких випадках значення роботи сили додатне? від'ємне? дорівнює нулю? 3. Яким є геометричний зміст роботи сили? 4. Дайте означення кінетичної енергії. 5. Доведіть теорему про кінетичну енергію. 6. Сформулюйте означення потужності. Яка її одиниця в СІ? Як обчислити потужність у даний момент часу?



### Вправа № 15

- Наведіть приклади ситуацій, коли сила, що діє на тіло, виконує додатну роботу; від'ємну роботу; не виконує роботи.
  - Яку роботу потрібно виконати, щоб рівномірно підняти вантаж масою 10 кг на висоту 5 м?
  - Під час космічних польотів серйозною небезпекою може стати зіткнення корабля з невеликими високошвидкісними метеоритами. Визначте кінетичну енергію метеорита масою 1 кг, який рухається зі швидкістю 60 км/с.
  - На рисунку показано сили, що діють на деяке тіло. Установіть відповідність між можливим напрямком руху тіла та знаком роботи сили.
- |               |                               |
|---------------|-------------------------------|
| 1 $\vec{v}_1$ | A $A_1 > 0, A_2 < 0, A_3 = 0$ |
| 2 $\vec{v}_2$ | B $A_1 > 0, A_2 > 0, A_3 < 0$ |
| 3 $\vec{v}_3$ | C $A_1 < 0, A_2 > 0, A_3 > 0$ |
|               | D $A_1 = 0, A_2 < 0, A_3 > 0$ |
5. Автомобіль масою 1 т збільшив швидкість свого руху від 10 до 20 м/с. Визначте роботу рівнодійної сил, які діють на автомобіль.
6. Ракета, яка летить зі швидкістю  $v_0$ , розігналася до вдвічі більшої швидкості. У результаті згоряння палива повна маса ракети зменшилася вдвічі порівняно з її масою на початку розгону. У скільки разів змінилася при цьому кінетична енергія ракети?
7. Автомобіль масою 2 т рушає з місця з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$  і розганяється на горизонтальній ділянці дороги до швидкості 20 м/с. Визначте роботу сили тяги та середню потужність двигуна автомобіля, якщо коефіцієнт опору рухові дорівнює 0,01.
8. Коли людина стоїть і тримає важкий вантаж, вона не виконує роботи, адже в цьому випадку переміщення вантажу дорівнює нулю. Чому ж тоді людина втомлюється? Спробуйте відповісти на це питання самостійно. Якщо не вийде, скористайтесь додатковими джерелами інформації.
9. Згадайте, який ще вид механічної енергії, крім кінетичної, ви знаєте. Наведіть приклади тіл, що мають цю енергію.



### Фізика і техніка в Україні



Державне підприємство «Антонов» (Київ) — український авіабудівний концерн, що об'єднує конструкторське бюро, комплекс лабораторій, випробувальний комплекс та експериментальний завод.

У 1946 р. у Новосибірську було створено дослідно-конструкторське бюро — ДКБ-153, головним конструктором якого був призначений видатний український радянський літакобудівник **Олег Костянтинович Антонов** (1906–1984). У 1952 р. ДКБ переїхало до Києва, де розпочалося серійне виробництво відомого «кукурудзника» — літака Ан-2.

Сьогодні на підприємстві виробляють літаки понад 100 типів, виконують проектування, виробництво, модернізацію авіаційної техніки та наземного транспорту, здійснюють міжнародні вантажні авіаперевезення тощо.



## § 16. ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ



Піднятий на деяку висоту важкий молот не має кінетичної енергії, бо швидкість його руху дорівнює нулю. Проте, якщо молот відпустити, він виконає роботу, наприклад розплющить метал. Натягнута тятива лука теж не має кінетичної енергії, але, випрямляючись, тятива надасть швидкості стрілі, а отже, виконає роботу. І деформоване тіло, і тіло, підняте над поверхнею Землі, здатні виконати роботу, тобто мають енергію. Що це за енергія і як її обчислити?

## 1

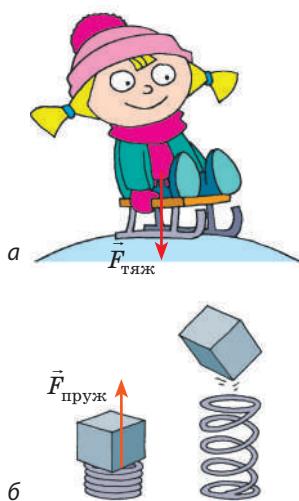
### Коли тіло має потенціальну енергію

**Механічна енергія  $E$**  — це фізична величина, яка характеризує здатність тіла (системи тіл) виконати роботу.

*Однина енергії в СІ (як і роботи) — джоуль  $[E]=1$  Дж (J).*

Будь-яке тіло, що рухається, може виконати роботу, оскільки воно має кінетичну енергію, або «живу силу», як її називали раніше. Є ще один вид механічної енергії — її називали «мертва сила». Це — **потенціальна енергія** (від латин. *potentia* — сила, можливість), — енергія, яку має тіло в результаті взаємодії з іншими тілами.

**Потенціальна енергія  $E_p$**  — це енергія, яку має тіло внаслідок взаємодії з іншими тілами або внаслідок взаємодії частин тіла між собою.



**Рис. 16.1.** І дівчинка внаслідок взаємодії із Землею (а), і стиснена пружина внаслідок взаємодії її витків (б) мають потенціальну енергію

Дівчинка на вершині гірки (рис. 16.1, а) має потенціальну енергію, бо в результаті взаємодії із Землею може почати рух і сила тяжіння виконає роботу. Але як обчислити цю роботу, адже гірка нерівна й тому протягом усього часу руху кут між напрямком сили тяжіння і напрямком переміщення змінюватиметься?

Стиснена пружина (рис. 16.1, б) теж має потенціальну енергію, оскільки при розпрямленні пружини сила пружності виконає роботу — підкине цегlinu. Але як обчислити цю роботу, адже під час дії пружини на цегlinu сила пружності безперервно зменшується?

Виявляється, все не так складно. І сила тяжіння, і сила пружності мають одну «чудову» властивість — робота цих сил не залежить від форми траєкторії.

Сили, робота яких не залежить від форми траєкторії, а визначається тільки початковим і кінцевим механічними станами тіла (системи тіл), називають **консервативними**, або **потенціальними, силами** (від латин. *conservare* — зберігати, охороняти).

## 2 Потенціальна енергія піднятого тіла

Доведемо, що сила тяжіння є консервативною силою. Для цього визначимо роботу сили тяжіння під час руху тіла з точки  $K$  у точку  $B$  різними траєкторіями.

**Випадок 1.** Нехай траєкторія руху тіла — «сходинка» (рис. 16.2, а): спочатку тіло падає з деякої висоти  $h_0$  до висоти  $h$  і сила тяжіння виконує роботу  $A_1$ , потім тіло рухається горизонтально і сила тяжіння виконує роботу  $A_2$ . Робота — величина адитивна, тому загальна робота  $A = A_1 + A_2$ .

$A_1 = F_{\text{тяж}} s_1 \cos \alpha$ , де  $F_{\text{тяж}} = mg$ ,  $s_1 = h_0 - h$ ,  $\cos \alpha = 1$  ( $\alpha = 0$ ), тому  $A_1 = mg(h_0 - h) = mgh_0 - mgh$ ;  $A_2 = 0$ , оскільки сила тяжіння перпендикулярна до переміщення тіла. Отже:

$$A = mgh_0 - mgh.$$

**Випадок 2.** Нехай тіло переміщується з точки  $K$  у точку  $B$ , зісковзуючи похилою площину (рис. 16.2, б). У цьому випадку робота сили тяжіння становить:  $A = mgs \cos \alpha = mgh_0 - mgh$ .

Той самий результат отримаємо й для випадків переміщення тіла довільною траєкторією.

Отже, *робота сили тяжіння не залежить від траєкторії руху тіла, тобто сила тяжіння — консервативна сила*.

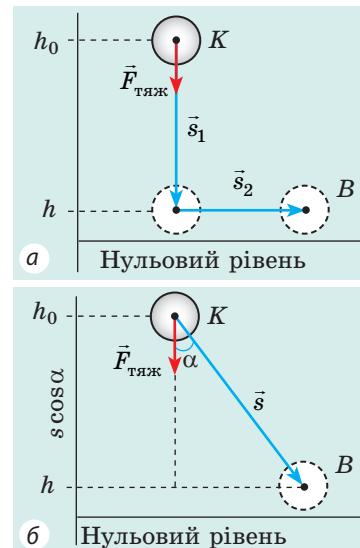
Величину  $mgh$  називають **потенціальною енергією піднятого тіла**:

$$E_p = mgh$$

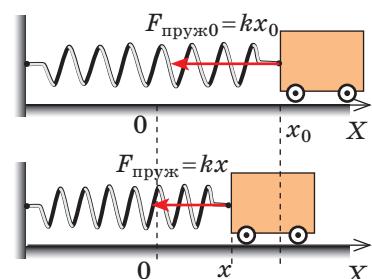
Потенціальна енергія піднятого тіла залежить від висоти, на якій перебуває тіло, тобто залежить від вибору *нульового рівня*, — *рівня, від якого буде відлічуватися висота*. Нульовий рівень обирають з міркувань зручності. Так, перебуваючи в кімнаті, за нульовий рівень доцільно взяти підлогу, визначаючи висоту гори — поверхню Світового океану. *Зверніть увагу! Зміна потенціальної енергії, а отже, і робота сили тяжіння від вибору нульового рівня не залежать.*

## 3 Потенціальна енергія пружно деформованого тіла

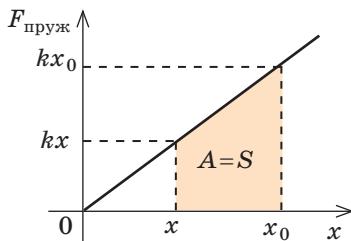
Нехай є пружно деформоване тіло, наприклад розтягнута пружина. Визначимо роботу, яку виконає сила пружності під час зменшення видовження пружини від  $x_0$  до  $x$  (рис. 16.3).



**Рис. 16.2.** У випадку переміщення тіла з висоти  $h_0$  до висоти  $h$  робота сили тяжіння, незалежно від траєкторії руху тіла, визначатиметься за формулою:  $A = mgh_0 - mgh$



**Рис. 16.3.** Якщо пружину звільнити, то, стискаючись, вона виконає роботу (надасть рух візку), при цьому деформація пружини зменшиться



**Рис. 16.4.** Сила пружності лінійно залежить від видовження ( $F_{\text{пруж}} = kx$ ), тому графік залежності  $F_{\text{пруж}}(x)$  — відрізок прямої, а робота сили пружності чисельно дорівнює площі трапеції під графіком

Для цього скористаємося геометричним змістом механічної роботи (рис. 16.4):

$$A = \frac{kx_0 + kx}{2}(x_0 - x) \Rightarrow A = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Отже, *робота сили пружності визначається тільки початковим і кінцевим станами пружини, тобто сила пружності — консервативна сила*. Величину  $kx^2/2$  називають **потенціальною енергією пружно деформованого тіла**:

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

*Робота сили пружності (як і робота сили тяжіння) дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятій із протилежним знаком:*

$$A = E_{p0} - E_p = -\Delta E_p$$

Останній вираз — математичний запис **теореми про потенціальну енергію**: *робота всіх консервативних сил, які діють на тіло, дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятій із протилежним знаком.*

*Стан із меншою потенціальною енергією є енергетично вигідним; будь-яка замкнена система прагне перейти в такий стан, у якому її потенціальна енергія є мінімальною*, — у цьому полягає **принцип мінімуму потенціальної енергії**. Дійсно, камінь, випущений з руки, ніколи не полетить угору — він падатиме, прагнучи досягнути стану з найменшою потенціальною енергією. Недеформована пружина ніколи не почне розтягуватись або стискатись сама, а деформована прагне перейти в недеформований стан.

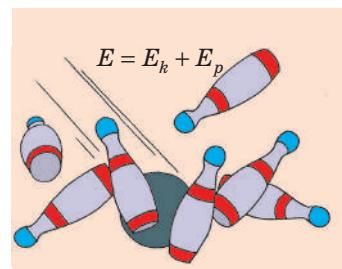
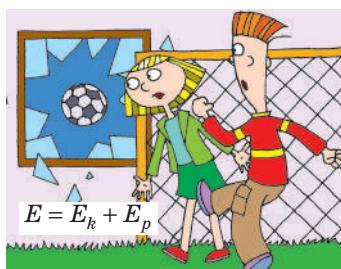
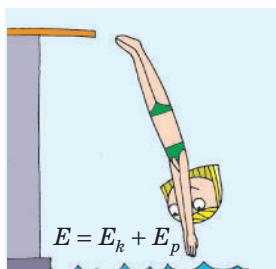
#### 4

### Закон збереження повної механічної енергії

Часто тіло чи система тіл мають і потенціальну, і кінетичну енергії.

Суму кінетичної і потенціальної енергій системи називають **повною механічною енергією системи тіл** (рис. 16.5):

$$E = E_k + E_p$$



**Рис. 16.5.** Повна механічна енергія  $E$  системи тіл дорівнює сумі потенціальної енергії  $E_p$  (визначається взаємним розташуванням тіл системи) і кінетичної енергії  $E_k$  (визначається швидкістю руху тіл системи)

Розглянемо замкнену систему тіл, які взаємодіють одне з одним *тільки консервативними силами* (силами тяжіння або силами пружності). Згідно з теоремою про потенціальну енергію робота  $A$ , виконувана цими силами, дорівнює:  $A = E_{p0} - E_p$ . З іншого боку, відповідно до теореми про кінетичну енергію *ця сама робота* дорівнює:  $A = E_k - E_{k0}$ . Зрівнявши праві частини рівностей, отримаємо **закон збереження повної механічної енергії**:

У замкненій системі тіл, які взаємодіють тільки консервативними силами, повна механічна енергія залишається незмінною (зберігається):

$$E_{p0} + E_{k0} = E_p + E_k$$

Закон збереження повної механічної енергії передбачає *перетворення кінетичної енергії на потенціальну й навпаки* (рис. 16.6). Однак чи зберігається при цьому повна механічна енергія? Наш досвід підказує, що ні.

Річ у тім, що **закон збереження повної механічної енергії виконується тільки в тому випадку, якщо в системі відсутнє тертя**. Однак у природі не існує рухів, які не супроводжуються тертям. Сила тертя завжди направлена проти руху тіла, тому під час руху вона виконує від'ємну роботу, при цьому повна механічна енергія системи зменшується:

$$A_{\text{тертя}} = E - E_0 = \Delta E ,$$

де  $A_{\text{тертя}}$  — робота сили тертя;  $E$  — повна механічна енергія системи наприкінці спостереження;  $E_0$  — повна механічна енергія системи на початку спостереження.

Втрати енергії спостерігаються й у випадку непружного удару.

Тож у разі наявності тертя або в разі непружної деформації енергія безслідно зникає? Здавалося б, так. Однак вимірювання показують, що і внаслідок тертя, і внаслідок непружного удару температура тіл, що взаємодіють, збільшується, тобто збільшується їх внутрішня енергія. Отже, кінетична енергія не зникає, а перетворюється на внутрішню енергію.

**Енергія нікуди не зникає й нізвідки не з'являється: вона лише перетворюється з одного виду на інший, передається від одного тіла до іншого.**

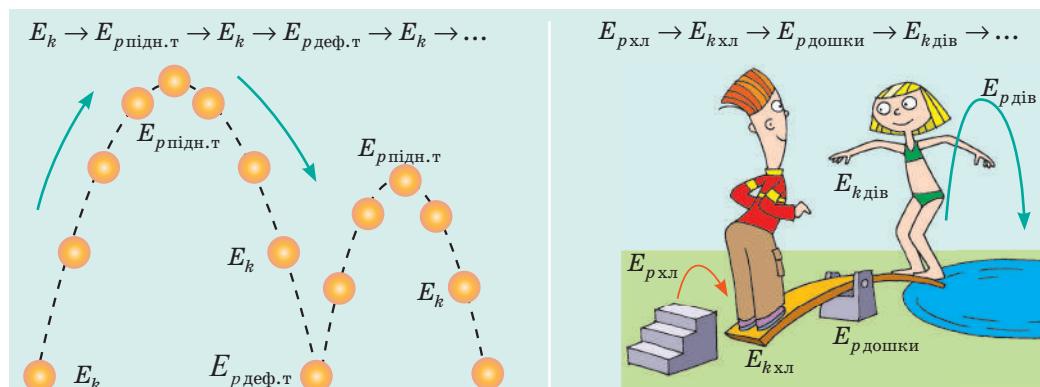


Рис. 16.6. Перетворення одного виду механічної енергії на інший вид спостерігається всюди

## Алгоритм розв'язування задач із застосуванням закону збереження механічної енергії

1. Прочитайте умову задачі. З'ясуйте, чи є система замкненою, чи можна знемехувати дією сил опору. Запишіть коротку умову задачі.
  2. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому позначте нульовий рівень, початковий і кінцевий стани тіла (системи тіл).
  3. Запишіть закон збереження і піретворення 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.
  5. Перевірте одиницю, знайдіть значення шуканої величини.
  6. Проаналізуйте результат, запишіть відповідь.

Дано:  
 $l = 0,5 \text{ м}$   
 $g = 10 \text{ м/с}^2$

*Розв'язання.* На рисунку зазначимо положення кульки в найвищій і най-  
нижчій точках траекторії; сили, які діють на кульку в найвищій точці;  
напрямок прискорення. За законом збереження механічної енергії:

$$v_0 = ? \quad E_{k,0} + E_{p,0} = E_k + E_p.$$

$$\begin{aligned} E_{k0} &= \frac{mv_0^2}{2}, & E_k &= \frac{mv^2}{2}, \\ E_{p0} &= 0; & E_p &= mgh = mg \cdot 2l; \end{aligned}$$

$$\frac{mv_0^2}{2} + 0 = \frac{mv^2}{2} + 2mgl \Rightarrow v_0^2 = v^2 + 4gl \quad (1).$$

За другим законом Ньютона:  $mg = ma_{\text{дщ}} \Rightarrow g = a_{\text{дщ}}$ .

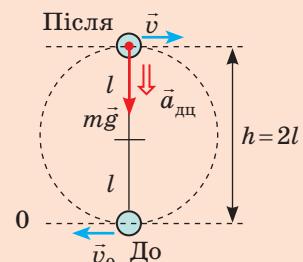
Оскільки  $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}$ , а  $r = l$ , маємо:  $\frac{v^2}{l} = g$ , тобто  $v^2 = lg$  (2).

Підставимо вираз (2) у вираз (1):  $v_0^2 = gl + 4gl = 5gl$ . Отже,  $v_0 = \sqrt{5gl}$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v_0] = \sqrt{\frac{M}{c^2} \cdot M} = \sqrt{\frac{M^2}{c^2}} = \frac{M}{c}; \quad v_0 = \sqrt{5 \cdot 10 \cdot 0,5} = \sqrt{25} = 5 \text{ (m/s).}$$

Відповідь:  $v_0 = 5 \text{ м/с.}$





## Підбиваємо підсумки

- Механічна енергія  $E$  — це фізична величина, яка характеризує здатність тіла (системи тіл) виконати роботу. Повна механічна енергія системи тіл складається з кінетичних енергій руху тіл цієї системи і потенціальних енергій їх взаємодій:  $E = E_k + E_p$ .
- Потенціальна енергія — це енергія, яку має тіло внаслідок взаємодії з іншими тілами або внаслідок взаємодії частин тіла між собою. Потенціальна енергія піднятого тіла обчислюється за формулою  $E_p = mgh$ , пружно деформованого тіла — за формулою  $E_p = kx^2/2$ .
- Сила пружності та сила тяжіння — консервативні (потенціальні) сили: робота цих сил не залежить від форми траекторії та дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятій із протилежним знаком:  $A = E_{p0} - E_p = -\Delta E_p$ .
- У замкненій системі тіл, які взаємодіють тільки консервативними силами, повна механічна енергія залишається незмінною (зберігається):  $E_{p0} + E_{k0} = E_p + E_k$ .

## Контрольні запитання



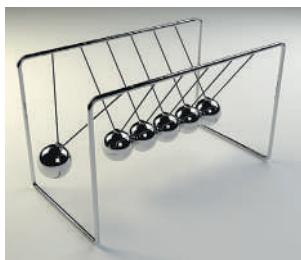
1. Дайте означення механічної енергії; потенціальної енергії. 2. Доведіть, що робота сили тяжіння не залежить від форми траекторії. 3. За якою формулою визначають потенціальну енергію пружно деформованого тіла? 4. У чому полягає принцип мінімуму потенціальної енергії? Наведіть приклади на його підтвердження. 5. За яких умов виконується закон збереження повної механічної енергії? 6. Наведіть приклади, коли повна механічна енергія не зберігається. Що можна сказати про повну енергію системи?



## Вправа № 16

1. Людина підняла відро з піском масою 15 кг на висоту 6 м, а потім повернула його назад. Чи виконала при цьому роботу сила тяжіння? Якщо так, то обчисліть її.
2. Доведіть, що у випадку, коли тіло рухається замкненою траєкторією, робота консервативних сил дорівнює нулю.
3. Тіло масою 1 кг має потенціальну енергію 20 Дж. На яку висоту над Землею піднято тіло, якщо за нульовий рівень потенціальної енергії прийнято точку на поверхні Землі?
4. Пружинний пістолет заряджають кулькою та стріляють угору. Які при цьому відбуваються перетворення енергії?
5. Камінь, що доти перебував у стані спокою, падає з висоти 20 м. На якій висоті швидкість руху каменя дорівнюватиме 10 м/с? Із якою швидкістю камінь упаде на землю? Опором повітря знехтуйте.
6. До горизонтальної пружини, стиснутої на 4 см, прикріплено візок масою 400 г. Визначте максимальну швидкість руху візка по столу після вивільнення пружини, якщо жорсткість пружини 250 Н/м. Втрати енергії не враховуйте.
7. Велосипедист, який рухався зі швидкістю 9 км/год, різко зупиняється. Яку роботу виконує при цьому сила тертя? Куди «зникає» механічна енергія велосипедиста? Визначте гальмівний шлях велосипедиста, якщо середня сила тертя — 400 Н. Маса велосипедиста разом із велосипедом — 80 кг.
8. Існує небезпечне явище природи — сель у горах (потік каміння та грязі). Чому при цьому важкі валуни можуть набирати величезну швидкість? Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про селі більше.

## § 17. ІМПУЛЬС ТІЛА. РЕАКТИВНИЙ РУХ. ПРУЖНЕ І НЕПРУЖНЕ ЗІТКНЕННЯ



Багато хто з вас бачив іграшку «колиска Ньютона» — кілька стальових кульок, підвішених упритул одна до одної. Якщо першу кульку відвести вбік і відпустити, то остання відхилиться приблизно на такий самий кут, на який було відведено першу кульку. Повернувшись, остання кулька вдарить систему з решти п'яти кульок, після чого знову відхилиться перша кулька, а потім усе повториться. При цьому середні кульки залишаються практично нерухомими. Дію цієї іграшки легко пояснити, якщо скористатися законом збереження енергії та законом збереження імпульсу.



**Рис. 17.1.** Чим більша сила діє на тіло і чим триваліша дія цієї сили, тим сильніше змінюється імпульс тіла

### 1 Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу

У § 16 ви згадали закон збереження механічної енергії, а в цьому згадаєте ще одну фізичну величину, яка має властивість зберігатися, — **імпульс тіла**.

**Імпульс тіла**  $\vec{p}$  — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси  $m$  тіла на швидкість  $\vec{v}$  його руху:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Одиниця імпульсу тіла в СІ — **кілограм-метр за секунду**:  $[p] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ .

Запишемо другий закон Ньютона в імпульсному вигляді:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\vec{F}}{m}$ , тобто:

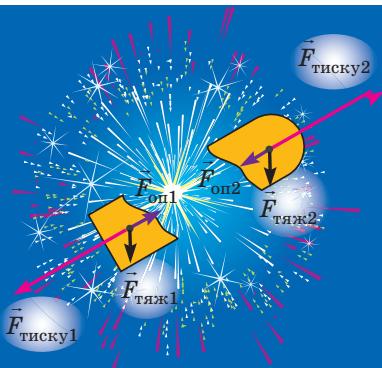
$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \text{ або } \vec{F}t = \vec{p} - \vec{p}_0.$$

Величину  $\vec{F}t$  називають **імпульсом сили**. Отже, **імпульс сили дорівнює зміні імпульсу тіла**:  $\vec{F}t = \Delta \vec{p}$  (див. [рис. 17.1](#)).



Як змінюється імпульс вашого тіла, коли на змаганнях із бігу ви зі старту набираєте швидкість 8 м/с? Знайдіть середнє значення сили, з якою ви відштовхуєтесь від ґрунту, якщо розбіг триває 2 с.

**У замкненій системі тіл** — системі, в якій тіла взаємодіють лише одним, а зовнішні сили відсутні, зрівноважені або нехтовно малі (див., наприклад, [рис. 17.2](#)), **сумарний імпульс тіл**



**Рис. 17.2.** Під час розриву снаряду для феєрверка сумарний імпульс системи зберігається, оскільки в момент розриву зовнішні сили (сила тяжіння та сила опору) незначні порівняно із силами тиску порохових газів

залишається незмінним (зберігається), тобто виконується **закон збереження імпульсу**:

У замкненій системі тіл векторна сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів тіл після взаємодії:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n ,$$

де  $n$  — кількість тіл системи.

Ураховуючи, що імпульс тіла дорівнює добутку маси  $m$  і швидкості  $\vec{v}$  руху тіла, закон збереження імпульсу можна записати так:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$$

Із проявами закону збереження імпульсу ми маємо справу в природі, техніці, побуті тощо. Розглянемо два приклади застосування цього закону: *реактивний рух і зіткнення тіл*.

## 2

### Від чого відштовхуються ракети

Згадайте дослід із кулькою, яка рухається завдяки повітря, що виривається з її отвору (рис. 17.3). Цей рух — приклад *реактивного руху*.

**Реактивний рух** — це рух, що виникає внаслідок відділення з деякою швидкістю від тіла якоїсь його частини.

Реактивний рух можна спостерігати в природі (рис. 17.4); його широко використовують у техніці: найпростіші поливні системи, автомобілі на реактивній тязі, катери з водометними двигунами, реактивні літаки й, звичайно, *ракети*, адже реактивний рух — це єдиний спосіб пересуватися в безповітряному просторі.

**Ракета** — літальний апарат, який переміщується в просторі завдяки реактивній тязі, що виникає внаслідок відкидання ракетою частини власної маси.

Відокремлюваною частиною ракети є струмінь гарячого газу, який утворюється під час згоряння палива. Коли газовий струмінь із величезною швидкістю викидається із сопла ракети, то оболонка ракети одержує потужний імпульс, направлений у бік, протилежний руху струменя.

Якби паливо згорало миттєво, а розпечений газ відразу цілком викидався б із ракети, то закон збереження імпульсу для системи «оболонка ракети — розпечений газ» мав би вигляд:  $0 = m_{\text{об}} \vec{v}_{\text{об}} + m_{\text{газу}} \vec{v}_{\text{газу}}$  (оскільки до старту імпульс системи дорівнює нулю), а отже, оболонка ракети набувала б швидкості:  $\vec{v}_{\text{об}} = -\frac{m_{\text{газу}} \vec{v}_{\text{газу}}}{m_{\text{об}}} .$

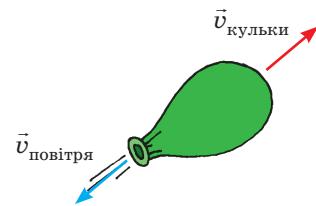


Рис. 17.3. Реактивний рух повітряної кульки

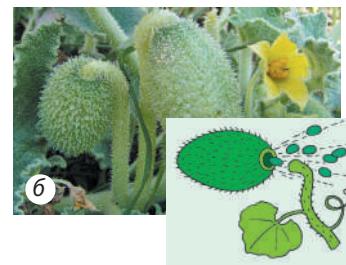


Рис. 17.4. Завдяки реактивному руху пересуваються багато мешканців морів і океанів (а); «шалений огірок» (огірок-пірскач) може подолати відстань до 12 м, розсюючи по дорозі насіння (б)



13 квітня 2018 р. виповнилося 25 років із дня першого запуску української ракети-носія «Зеніт», створеної в конструкторському бюро «Південне» і на заводі «Південмаш» (Дніпро).

Зараз удосконалена триступенева ракета-носій «Зеніт-3SL» є найдосконалішим і найпотужнішим літальним апаратом свого класу у світі. Екологічно чистий (працює на кисні та гасі), недорогий, надійний «Зеніт» може бути запущений за будь-яких метеорологічних умов, здатен виводити на навколоземну орбіту супутники масою до 13 т.

Винахідник і підприємець Ілон Маск, засновник компанії SpaceX, яка працює в галузі будівництва космічного транспорту, на запитання журналістки про улюблenu ракету відповів: «Найкраща ракета (після моєї) — це «Зеніт»».

На жаль, паливо згоряє поступово, тому частину газу доводиться «розганяти» разом із оболонкою; до того ж систему «оболонка ракети — розпечений газ» не можна вважати замкненою (зі збільшенням швидкості руху ракети значно зростає опір повітря). Обчислення з урахуванням цих і низки інших чинників показують, що для досягнення першої космічної швидкості (8 км/с) маса палива має у 200 разів перевищувати масу оболонки. А треба ж піднімати на орбіту не лише оболонку, а й обладнання, космонавтів, запаси води, кисню тощо. Через це виникла ідея використання *багатоступеневих ракет*. Кожний ступінь такої ракети має запас палива та власний реактивний двигун, який розганяє ракету, доки не витратить паливо. Після цього ступінь відкидається, полегшуючи решту ракети та надаючи їй додаткового імпульсу.

Саме на багатоступеневих ракетах було зроблено перші кроки людства в космос: 4 жовтня 1957 р. радянські вчені вивели на навколоземну орбіту *перший штучний супутник* Землі, а 12 квітня 1961 р. — космічний корабель «Восток», на борту якого був *перший у світі космонавт Юрій Олексійович Гагарін*; 21 липня 1969 р. американські астронавти *Ніл Армстронг і Базз Олдрін* *уперше висадилися на Місяці*.

Пройшло лише 60 років, а ми вже не можемо уявити своє життя без космосу. Згадайте: супутникова телебачення і супутниковий зв'язок, система GPS і супутниковий Інтернет, надійний прогноз погоди та супутникovi карти. Зараз створено космічні кораблі багаторазового використання, космічні апарати висадилися на Венеру, Марс та інші планети Сонячної системи.

### 3

### Пружне і непружне зіткнення

Короткочасну взаємодію тіл, у ході якої тіла безпосередньо торкаються одне одного, називають **зіткненням**.

У системі тіл, що стикаються, в ході зіткнення зазвичай виникають великі (порівняно

із зовнішніми) внутрішні сили, тому під час зіткнення систему тіл можна вважати замкненою і, розглядаючи зіткнення, використовувати закон збереження *імпульсу*. А от повна механічна енергія зберігається не завжди. Потенціальна енергія тіл безпосередньо до зіткнення і відразу після нього в більшості випадків є однаковою, тому далі йтиметься лише про кінетичну енергію.

Якщо після зіткнення сумарна кінетична енергія тіл зберігається, таке зіткнення називають **пружним** (рис. 17.5).

Якщо після зіткнення частина кінетичної енергії перетворюється на внутрішню енергію (витрачається на деформацію та нагрівання тіл), таке зіткнення називають **непружним**. Непружне зіткнення, після якого тіла рухаються як єдине ціле, називають **абсолютно непружним** (рис. 17.6).

Якщо швидкості руху тіл до і після зіткнення (пружного чи непружного) напрямлені вздовж прямої, що проходить через центри мас цих тіл, таке зіткнення називають **центральним**.

Абсолютне непружне та пружне центральні зіткнення розглянемо на прикладах розв'язування задач.

#### 4 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Дві кульки масами 300 і 200 г, які рухаються зі швидкостями 4 і 2 м/с відповідно, зазнають центрального абсолютно непружного зіткнення. Визначте, скільки кінетичної енергії кульок перетвориться на внутрішню, якщо: 1) кульки рухаються назустріч одна одній; 2) кульки рухаються одна за одною.

**Дано:**

$$m_1 = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,2 \text{ кг}$$

$$v_{01} = 4 \text{ м/с}$$

$$v_{02} = 2 \text{ м/с}$$

$$E_{k0} - E_k = ?$$

$$E_{k0} - E'_k = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Зіткнення абсолютно непружне, тому: 1) після зіткнення кульки рухаються як одне ціле; 2) сумарний імпульс системи зберігається; 3) кінетична енергія системи зменшується (частина енергії перетвориться на внутрішню).

**Розв'язання**

Знайдемо сумарну кінетичну енергію системи кульок до зіткнення:

$$E_{k0} = E_{k01} + E_{k02} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2}; E_{k0} = \frac{0,3 \cdot 16}{2} + \frac{0,2 \cdot 4}{2} = 2,8 \text{ (Дж)}.$$

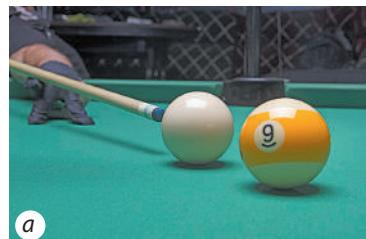


Рис. 17.5. Зіткнення більярдних куль (а), удари м'яча по бетонній стіні (б) можна вважати пружними

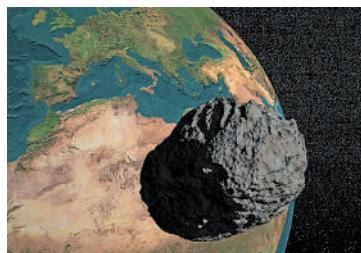
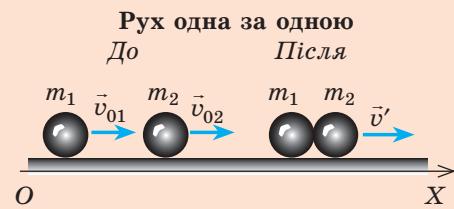
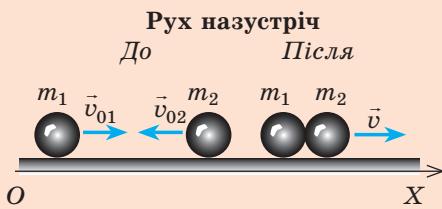


Рис. 17.6. Зіткнення метеорита із Землею є прикладом абсолютно непружного зіткнення

Виконаємо пояснівальні рисунки; вісь  $OX$  спрямуємо вздовж руху кульок:



Запишемо закон збереження імпульсу у векторному вигляді та в проекціях на вісь  $OX$ :

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v};$$

$$m_1 v_{01} - m_2 v_{02} = (m_1 + m_2) v.$$

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v}';$$

$$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = (m_1 + m_2) v'.$$

Знайдемо швидкість руху кульок після зіткнення:

$$v = \frac{m_1 v_{01} - m_2 v_{02}}{m_1 + m_2};$$

$$v = \frac{0,3 \cdot 4 - 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 1,6 \text{ м/с.}$$

$$v' = \frac{m_1 v_{01} + m_2 v_{02}}{m_1 + m_2};$$

$$v' = \frac{0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 3,2 \text{ м/с.}$$

Знайдемо сумарну кінетичну енергію системи кульок після зіткнення:

$$E_k = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2};$$

$$E_k = \frac{0,5 \cdot 1,6^2}{2} = 0,64 \text{ (Дж).}$$

$$E'_k = \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2};$$

$$E'_k = \frac{0,5 \cdot 3,2^2}{2} = 2,56 \text{ (Дж).}$$

Визначимо зменшення кінетичної енергії системи кульок:

$$E_{k0} - E_k = 2,8 \text{ Дж} - 0,64 \text{ Дж} = 2,16 \text{ Дж.} \quad | \quad E_{k0} - E'_k = 2,8 \text{ Дж} - 2,56 \text{ Дж} = 0,24 \text{ Дж.}$$

Відповідь: 1) 2,16 Дж; 2) 0,24 Дж.

**Аналіз результату.** Бачимо, що в разі лобового зіткнення кульок на внутрішню енергію перетворюється значно більша кількість механічної енергії.

Поміркуйте, як отримані результати стосуються аварій на дорогах.

**Задача 2.** Дві кульки однакової маси, які рухаються зі швидкостями 4 і 2 м/с відповідно, зазнають центрального пружного зіткнення. Визначте швидкості руху кульок після зіткнення, якщо: 1) кульки рухаються назустріч одна одній; 2) кульки рухаються одна за одною.

**Дано:**

$$m_1 = m_2 = m$$

$$v_{01} = 4 \text{ м/с}$$

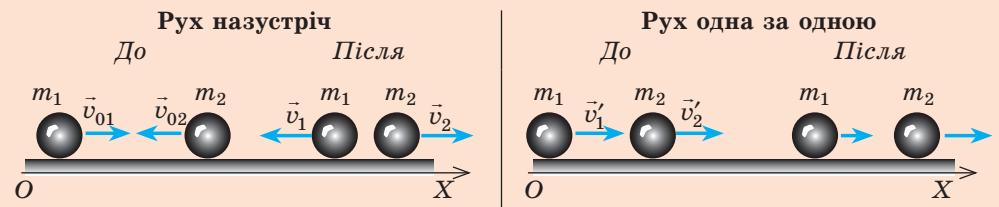
$$v_{02} = 2 \text{ м/с}$$

$$v_1 = ?$$

$$v_2 = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Зіткнення пружне, тому: 1) після зіткнення кульки рухаються із різними швидкостями; 2) сумарний імпульс системи зберігається, оскільки зовнішні сили, які діють на кульки, скомпенсовані; 3) кінетична енергія системи не змінюється. Для розв'язання задачі скористаємося законом збереження імпульсу та законом збереження механічної енергії.

Виконаємо пояснівальні рисунки; вісь  $OX$  спрямуємо вздовж руху кульок.



Запишемо закон збереження імпульсу в проекціях на вісь  $OX$  і закон збереження кінетичної енергії:

$$m_1 v_{01} - m_2 v_{02} = -m_1 v_1 + m_2 v_2;$$

$$\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}.$$

$$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = m_1 v_1' + m_2 v_2';$$

$$\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}.$$

Урахуємо, що  $m_1 = m_2 = m$ , і після скорочення отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} v_{01} - v_{02} = -v_1 + v_2, \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{01} + v_{02} = v_1' + v_2', \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1'^2 + v_2'^2. \end{cases}$$

Після простих перетворень маємо:

$$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1^2 = v_2^2 - v_{02}^2. \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{01} - v_1' = v_2' - v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1'^2 = v_2'^2 - v_{02}^2. \end{cases}$$

Поділимо друге рівняння системи на перше й отримаємо ще простішу систему:

$$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01} - v_1 = v_2 - v_{02}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{01} - v_1' = v_2' - v_{02}, \\ v_{01} + v_1' = v_2' + v_{02}. \end{cases}$$

Розв'яжемо отриману систему рівнянь методом додавання та знайдемо швидкості руху кульок після зіткнення:

$$v_2 = v_{01}; \quad v_1 = v_{02}.$$

$$v_2' = v_{01}; \quad v_1' = v_{02}.$$

*Відповідь:* для обох випадків  $v_1 = v_{02} = 2$  м/с;  $v_2 = v_{01} = 4$  м/с.

Бачимо, що під час пружного центрального зіткнення тіла однакової маси обмінюються швидкостями.

 Сподіваємось, тепер вам неважко пояснити, як працює «колоїска Ньютона».



### Підбиваємо підсумки

- Імпульс тіла  $\vec{p}$  — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси  $m$  тіла на швидкість  $\vec{v}$  його руху:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили:  $\Delta \vec{p} = \vec{F}t$ .
- Систему тіл можна вважати замкненою, якщо зовнішні сили, що 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:  $m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$ .
- Реактивний рух — це рух, який виникає внаслідок відділення з діякою швидкістю від тіла якоїсій його частини; це єдиний спосіб пересуватися в безповітряному просторі.



## Контрольні запитання

- Охарактеризуйте імпульс тіла як фізичну величину.
- Сформулюйте другий закон Ньютона в імпульсному вигляді.
- Сформулюйте та запишіть закон збереження імпульсу.
- Який рух називають реактивним? Наведіть приклади.
- Чому для запуску з поверхні Землі космічних кораблів використовують багатоступеневі ракети?
- Яке зіткнення називають непружним? абсолютно непружним? пружним? центральним? Наведіть приклади.
- Яким є результат пружного центрального зіткнення тіл однакової маси?

## Вправа № 17



- Дві кульки рухаються в одному напрямку (рис. 1). Як зміниться імпульс системи кульок після зіткнення? Відповідь обґрунтуйте.
- На рис. 2–4 наведено умови трьох задач. Розв'яжіть задачі, скориставшись законом збереження імпульсу.

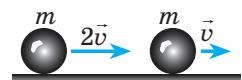


Рис. 1

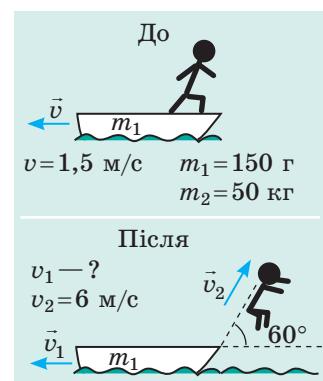
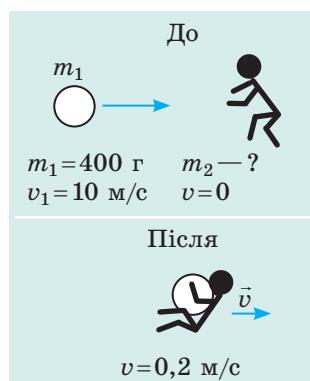
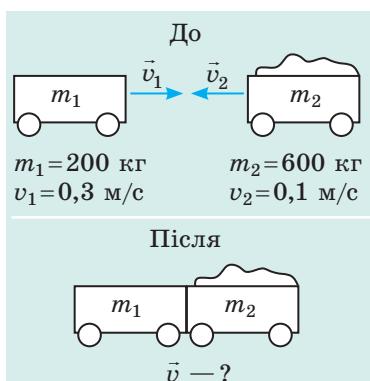


Рис. 2

Рис. 3

Рис. 4

- Якою є маса кульки, якщо внаслідок пружного центрального зіткнення з нерухомою кулькою масою 1 кг швидкість її руху зменшилася від 4 до 2 м/с? Розгляніть два можливі випадки.
- Визначте, який спортсмен надає спортивному снаряду найбільшого імпульсу: штовхач ядра — ядру; гравець у боулінг — кулі; гравець у гольф — м'ячу. Необхідні дані щодо мас і швидкостей руху снарядів знайдіть у додаткових джерелах інформації.



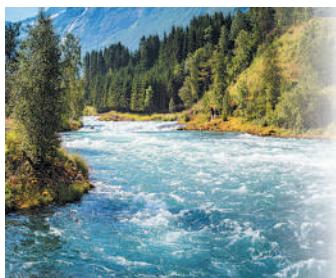
## Експериментальні завдання

- Візьміть дві однакові монети. Одну покладіть на аркуш і обведіть олівцем. Щиглем штовхніть на неї другу монету так, щоб зіткнення монет не було центральним. Проведіть лінії руху монет, виміряйте кут між напрямками їх руху. Повторіть дослід кілька разів, змінюючи швидкість руху монети. Поясніть одержані результати.
- Візьміть два пружні м'ячі різного розміру, покладіть великий м'яч на маленький (рис. 5), розташуйте м'ячі над твердою поверхнею та відпустіть. Повторіть дослід, розмістивши цього разу маленький м'яч над великим. Поясніть спостережувані явища.



Рис. 5

## § 18. РУХ РІДИНИ І ГАЗУ. ПІДІЙМАЛЬНА СИЛА КРИЛА



Чи можна не дуже досвідченому плавцю спробувати переплисти гірську річку? Здавалося б, чому ні, особливо якщо річка не дуже широка. Проте цього не слід робити в жодному разі — це дуже небезпечно! І справа не в ширині річки, а в тому, що в більшості гірських річок є стремнини — ділянки з великою швидкістю течії. Виплисти зі стремнини дуже важко — вона затягує й «не відпускає» плавця.

А от яке відношення має течія річки до підіймальної сили крила літака, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Де рідина рухається швидше

Проведемо дослід із горизонтальною трубкою, яка має різні поперечні перерізи та поршень (можна взяти шприц без голки). Наповнимо трубку водою і перемішуватимемо поршень із деякою незмінною швидкістю (рис. 18.1). Побачимо, що швидкість води у вузькій частині трубки буде більшою, ніж у широкій частині. Результати цього досліду можна було б і спрогнозувати.

Розглянемо стаціонарний потік ідеальної нестисливої рідини, тобто потік, в кожній точці якого швидкість руху рідини не змінюється з часом, а сили тертя нехтівно малі (рис. 18.2). Нехай  $v_1$  — швидкість течії у широкій частині труби з площею перерізу  $S_1$ , а  $v_2$  — швидкість течії у вузькій частині труби з площею перерізу  $S_2$ . За певний час  $t$  через ці перерізи протікають рівні об'єми рідини, які відповідно дорівнюють:

$$V_1 = S_1 \cdot l_1 = S_1 \cdot v_1 t; \quad V_2 = S_2 \cdot l_2 = S_2 \cdot v_2 t,$$

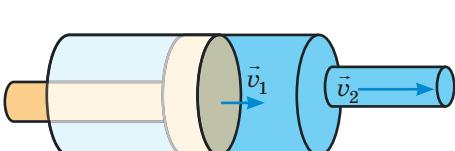
де  $l_1, l_2$  — відстані, які долає рідина за час  $t$ .

Оскільки  $V_1 = V_2$ , то  $S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$ . Після скорочення на  $t$  отримаємо рівняння нерозривності струменя:

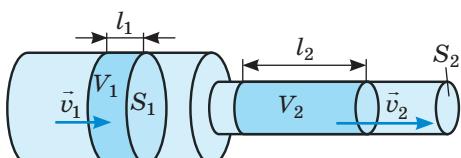
$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Отже, їй експериментальні, їй теоретичні дослідження підтверджують: чим менша площа перерізу, тим швидше рухається рідина.

Подібне явище можна спостерігати, якщо спускатися або підніматися річкою: течія повільна та плавна там, де річка глибока та широка, а на мілководді або у вузькій частині русла швидкість течії помітно збільшується.



**Рис. 18.1.** Чим менша площа перерізу трубки, тим швидше рухається рідина:  $v_2 > v_1$



**Рис. 18.2.** Якщо рідина нестислива, а потік стаціонарний, то об'єми  $V_1$  і  $V_2$  рідини, що протікає через перерізи  $S_1$  і  $S_2$  за певний інтервал часу  $t$ , є одинаковими:  $V_1 = V_2$

2

## Як тиск усередині рідини залежить від швидкості її руху

Повернемося до рис. 18.2. Швидкість течії в місці переходу з широкої частини труби у вузьку збільшується, тобто рідина *прискорює* свій рух. Наявність прискорення означає, що під час переходу на рідину діє деяка сила. Трубка розташована горизонтально, тому виникнення сили, що спричиняє прискорення, не може бути наслідком притягання Землі. Ця сила виникає внаслідок різниці тисків, тобто *тиск рідини в широкій частині труби (де швидкість течії менша) є більшим за тиск рідини у вузькій частині труби (де швидкість течії більша)*.

Першим цього висновку дійшов швейцарський фізик і математик *Даніель Бернуллі* (1700–1782), який установив закон, що стосується будь-якого стаціонарного потоку рідини, — **закон Бернуллі**:

Під час стаціонарного руху рідини тиск рідини є меншим там, де швидкість течії більша, і навпаки, тиск рідини є більшим там, де швидкість течії менша.



Спираючись на закон Бернуллі, поясніть, чому важко перепливати річку, яка містить ділянки з великою швидкістю течії.

*Закон Бернуллі є наслідком закону збереження механічної енергії:* рідина отримує кінетичну енергію (збільшує швидкість свого руху) завдяки тому, що потенціальна енергія пружної взаємодії частинок речовини зменшується (і навпаки). Якщо потік рідини не є горизонтальним, то зміна кінетичної енергії рідини відбувається ще й за рахунок зміни її потенціальної енергії гравітаційної взаємодії із Землею.

3

## Чому літають літаки

Кожен із вас, сідаючи в літак або дивлячись на його політ, імовірно, замислювався про те, чому літак піднімається і яка сила утримує його в повітрі. Дехто скаже, що це архімедова сила (але це не так, адже нерухомий літак не підніметься). Дехто припустить, що літак тримає сила реактивної тяги двигунів (і це теж неправильно, адже ця сила лише розганяє літак і підтримує швидкість його руху). Літак утримується в повітрі завдяки силі тиску, яка й створює *підіймальну силу*.

Виникнення підіймальної сили можна пояснити за допомогою закону Бернуллі, адже за певних умов повітряний потік можна розглядати як стаціонарний потік рідини. Під час польоту на крила літака увесь час набігає зустрічний потік повітря, і крила ніби «розрізають» його на дві частини: одна частина обтікає верхню поверхню крила, друга — нижню. Форма більшості крил така, що потік, який обтікає верхню (опуклу) частину крила, долає за той самий час більшу відстань (рухається з більшою швидкістю), ніж потік, який обтікає крило знизу (рис. 18.3). Відповідно до закону Бернуллі там, де швидкість потоку більша, тиск є меншим. Отже, *сила тиску, що діє на крило зверху, менша від сили тиску, що діє на крило знизу*.

Проте найважливіша причина утворення підіймальної сили — це наявність *кута атаки* — нахилення крил літака під певним кутом  $\alpha$  до повітряного потоку (рис. 18.4). У такому випадку підіймальна сила виникає

як за рахунок зменшення тиску над крилом, так і за рахунок збільшення тиску під крилом. Завдяки наявності кута атаки в повітрі піднімаються й літаки із симетричним профілем крила.

Різницю сил тисків називають *повною аеродинамічною силою* (див. [рис. 18.4](#)).

**Зверніть увагу!** Якщо швидкість руху повітряного потоку відносно літака наближається або перевищує швидкість поширення звуку (340 м/с), стисливістю повітря нехтувати не можна. Зрозуміло, що підіймальна сила теж виникає (інакше літаки не літали б із надзвуковою швидкістю), але повітряний потік поводиться дещо інакше.



### Підбиваємо підсумки

- Для стаціонарного потоку рідини або газу справджується закон Бернуллі: тиск рідини (газу) є більшим там, де швидкість течії менша, і навпаки.
- На законі Бернуллі ґрунтуються утворення підіймальної сили крила літака, аеродинамічна форма та кут нахилу якого змушує повітря над верхньою поверхнею крила рухатися з більшою швидкістю, тому тиск над крилом є меншим, ніж тиск під крилом.



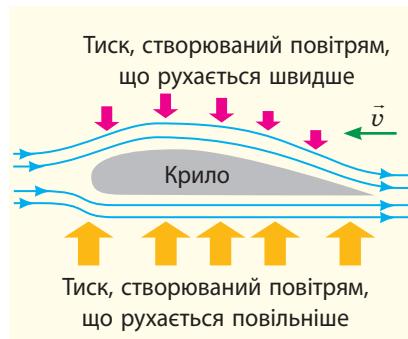
### Контрольні запитання

- Доведіть, що швидкість течії є більшою у вужчій частині труби.
- Спираючись на другий закон Ньютона, доведіть, що тиск рухомої рідини в широкій частині труби є більшим, ніж тиск цієї рідини у вузькій частині труби.
- Поясніть закон Бернуллі на основі закону збереження механічної енергії.
- Завдяки чому виникає підіймальна сила крила літака?

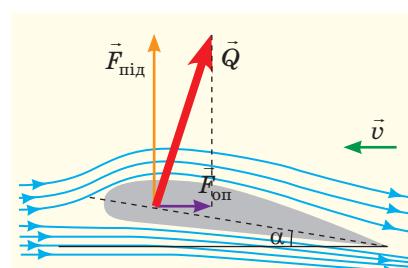


### Вправа № 18

- Чому притягаються два судна, які рухаються з великими швидкостями поряд одне з одним?
- Чому сильний ураганний вітер інколи зриває дахи будинків?
- Поясніть, як працює пульверизатор ([рис. 1](#)).
- Чому м'яч, якому надано обертання, змінює траєкторію свого руху ([рис. 2](#))? До речі, це явище називають *ефектом Магнуса*.



**Рис. 18.3.** Зазвичай крило літака має аеродинамічну форму: нижня поверхня крила майже плоска, верхня — опукла. Блакитними стрілками показано рух повітря, що набігає на крило, зеленою стрілкою — напрямок руху літака



**Рис. 18.4.** Кут атаки  $\alpha$  і повна аеродинамічна сила  $\vec{Q}$ . Вертикальна складова сили  $\vec{Q}$  — підіймальна сила  $\vec{F}_{\text{під}}$ , горизонтальна складова — сила опору  $\vec{F}_{\text{оп}}$



Рис. 1

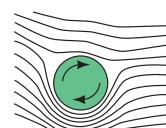


Рис. 2

5. Ви добре знаєте, що нерухома однорідна рідина в сполучених посудинах встановлюється на одній висоті. Чому, якщо рідина рухається, рівні рідини в сполучених посудинах є різними (рис. 3)?
6. Проаналізуйте інформацію в рубриці «Фізика в цифрах» наприкінці § 18 і наведіть подібні приклади, скориставшись додатковими джерелами інформації.

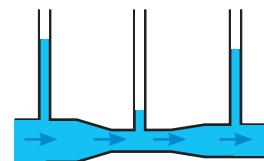


Рис. 3



### Експериментальні завдання

1. Візьміть аркуш паперу і подуйте на нього так, як показано на рис. 4. Поясніть спостережуване явище.
2. Візьміть фен і м'ячик для пінг-понгу. Увімкніть фен, спрямуйте струмінь повітря вертикально вгору та покладіть на нього м'ячик. М'ячик не впаде, а буде трохи коливатися всередині струменя. Якщо нахилити фен, то м'ячик теж не падатиме, а втягуватиметься в струмінь. Поясніть спостережувані явища.



Рис. 4

## Фізика в цифрах

Форма та розмір крил літаків залежать від їх призначення: чим довші крила, тим стійкіший літак, але йому важко повернати; більш маневрені літаки мають короткі крила.

### ■ Су-27

Один із основних літаків Повітряних сил ЗС України. Розмах крил — 14,7 м. Максимальна швидкість — 2125 км/год.



Короткі розширені крила дозволяють літаку виконувати в повітрі різкі повороти

### ■ АН-225 «Мрія»

Найбільший і найпотужніший у світі транспортний літак. Розроблений Київським КБ ім. О. К. Антонова і побудований на Київському механічному заводі в 1980-х рр. Розмах крил — 88,4 м. Максимальна швидкість — 850 км/год.



Чим на більшу вантажопідйомність розрахований літак, тим довші його крила

### ■ Sikorsky R-4 Hoverfly

Перший серійний гелікоптер у світі (з 1943 р. випускався в США, а з 1944 р. — у Великій Британії). Спроектований під керівництвом Ігоря Івановича Сікорського (народився в 1889 р. у Києві, закінчив Київський політехнічний інститут). Діаметр несучого гвинта — 11,6 м, максимальна швидкість — 132 км/год.



«Крила» гелікоптера обертаються, тому для створення підіймальної сили йому не потрібен розбіг. Гелікоптер може зависати в повітрі, рухатися в боки та назад



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

**Тема.** Дослідження руху зв'язаних тіл.

**Мета:** визначити коефіцієнт тертя ковзання дерева по дереву.

**Обладнання:** рулетка, терези з тягарцями (або динамометр), секундомір, трибометр, нерухомий блок, дерев'яний бруск, важок масою 100 г, міцна нитка завдовжки 1,5–2 м.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

**ІІ**

#### Підготовка до експерименту

1. Виміряйте масу  $m_1$  бруска 1.
2. Зберіть експериментальну установку (див. рис. 1).
3. Скориставшись формулою переміщення, доведіть: коли бруск 1 починає рух під дією тягарця 2, їх прискорення можна визначити за формулою:  $a = \frac{2H}{t^2}$  (1).
4. Для кожного тіла запишіть рівняння другого закону Ньютона і, врахувавши, що  $T_1 = T_2$ , а  $F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$ , доведіть, що  $\mu = \frac{m_2 g - (m_1 + m_2) a}{m_1 g}$  (2).

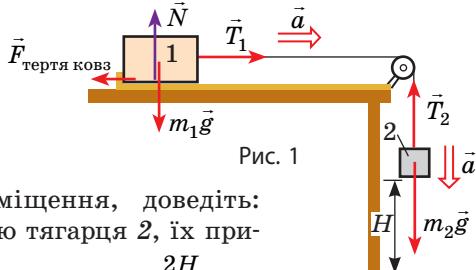


Рис. 1

#### Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Розташуйте бруск біля лівого краю трибометра й, утримуючи бруск, виміряйте відстань  $H$  від тягарця до підлоги (див. рис. 1).
2. Відпустіть бруск і виміряйте час  $t$ , через який тягарець торкнеться підлоги. Не змінюючи початкового розташування зв'язаних тіл, повторіть дослід ще тричі.

Номер досліду	Маса бруска $m_1$ , кг	Маса тягарця $m_2$ , кг	Висота падіння тягарця $H$ , м	Час падіння		Прискорення тягарця $a_{\text{sep}}$ , м/с <sup>2</sup>	Коефіцієнт тертя ковзання $\mu_{\text{sep}}$	Відносна похибка $\varepsilon$ , %
				$t$ , с	$t_{\text{sep}}$ , с			

#### Опрацювання результатів експерименту

1. Обчисліть середній час руху тягарця ( $t_{\text{sep}}$ ).
2. За формулою (1) визначте середнє прискорення руху тягарця ( $a_{\text{sep}}$ ).
3. За формулою (2) визначте середнє значення коефіцієнта тертя ковзання.
4. Оцініть відносну похибку експерименту, порівнявши значення коефіцієнта тертя ковзання  $\mu_{\text{sep}}$  дерева по дереву, отриманого в ході експерименту, з табличним значенням  $\mu_{\text{табл}}$ :  $\varepsilon_{\mu} = \left| 1 - \frac{\mu_{\text{sep}}}{\mu_{\text{табл}}} \right| \cdot 100\%$ .

**□**

#### Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. У висновку зазначте: 1) величину, яку ви вимірювали; 2) результат вимірювання; 3) причини похибки.

**+**

#### Творче завдання

Запишіть план проведення експерименту щодо визначення прискорення вільного падіння з використанням установки, зображеній на рис. 2. За можливості проведіть експеримент.

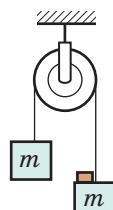


Рис. 2



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

**Тема.** Визначення центра мас плоскої фігури.

**Мета:** ознайомитися з методами визначення центра мас (центра тяжіння); визначити центр мас пластиини двома методами: експериментальним і геометричним.

**Обладнання:** штатив із муфтою та лапкою, картон, ножиці, тонкий цвях, шило, гайка (або інший невеликий вантаж), нитка завдовжки 30–40 см, лінійка.

## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ



## Підготовка до експерименту

1. Виріжте з картону плоску фігуру, яка має форму нерівнобічної трапеції (див. рис. 1).
2. У трьох кутах трапеції зробіть шилом отвори, діаметри яких трохи більші за діаметр цвяха.
3. Виготовте висок: до одного кінця нитки прив'яжіть гайку, на другому кінці зробіть петельку.

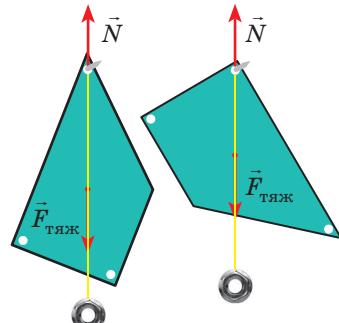


Рис. 1



## Експеримент 1. Визначення центра мас експериментальним методом

1. Закріпіть цвях горизонтально в лапці штатива так, щоб гострий кінець цвяха був вільним; підвісіть на цвях картонну фігуру і висок.
2. Після того як коливання пластиини та виска припиняться, олівцем поставте на картоні 2–3 точки вздовж нитки виска.
3. Зніміть пластиину та проведіть через позначені точки пряму лінію.
4. Повторіть дії ще для двох отворів. Переконайтесь, що всі три прямі перетнулися в одній точці. Ця точка і є центром мас фігури.



## Експеримент 2. Визначення центра мас геометричним методом

*Зверніть увагу:* фігуру для досліду беремо ту саму, а от побудови краще виконувати на її зворотному боці.

1. Розбийте фігуру на паралелограм і трикутник та знайдіть їх центри мас (точки  $O_1$  і  $O_2$  на рис. 2, а).
- Центр мас паралелограма розташований у точці перетину його діагоналей, центр мас трикутника — в точці перетину його медіан.
2. Розбийте фігуру на два трикутники та знайдіть їх центри мас (точки  $O_3$  і  $O_4$  на рис. 2, б).
3. Побудуйте відрізки  $O_1O_2$  і  $O_3O_4$ . Точка їх перетину і є центром мас фігури.

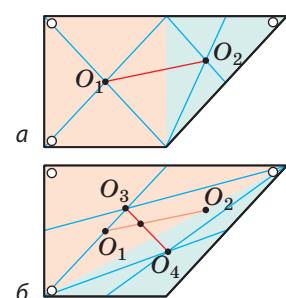


Рис. 2



## Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. У висновку зазначте: 1) що ви визначали, якими методами; 2) який метод, на вашу думку, є універсальнішим; 3) чи збіглися отримані результати; якщо ні, то в чому причина похибки.



## Творче завдання

Запропонуйте щонайменше два способи переконатися в тому, що знайдена вами точка є дійсно центром мас фігури.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ I «МЕХАНІКА»

## Частина 2. Динаміка і закони збереження

1. Ви згадали найважливіші закони динаміки — закони Ньютона.

### Перший закон Ньютона

постулює наявність інерціальних систем відліку

### Другий закон Ньютона

основний закон динаміки:  $\vec{a} = \vec{F} / m$

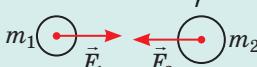
### Третій закон Ньютона

закон взаємодії:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

2. Ви поглибили свої знання щодо різних видів сил у механіці.

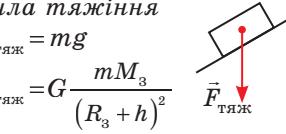
#### Гравітаційні

Сила всесвітнього тяжіння:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$



Сила тяжіння  $F_{\text{тяж}} = mg$

$F_{\text{тяж}} = G \frac{m M_3}{(R_3 + h)^2}$



#### СИЛИ В МЕХАНІЦІ

##### Сила тертя

Сила тертя спокою:  $F_{\text{тертя сп}} = F_{\text{зовн}}$

Сила тертя ковзання:  $F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$

Сила опору середовища залежить від форми, розмірів і швидкості руху тіла, від густини та в'язкості середовища

#### Електромагнітні

Сила пружності:  $F_{\text{пруж.} x} = -kx$

##### Вага тіла

•  $P = mg$ , якщо  $\vec{a} = 0$

•  $P = m(g + a)$ , якщо  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{g}$

•  $P = m(g - a)$ , якщо  $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{g}$

•  $P = 0$ , якщо  $\vec{a} = \vec{g}$

3. Ви дослідили умови рівноваги тіл, ознайомилися з видами рівноваги тіл.

#### Умови рівноваги тіла

Сили, що діють на тіло, скомпенсовані:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$$

Сума моментів сил дорівнює нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0, \text{ де } M = Fl$$

4. Ви згадали такі фізичні величини, як **механічна робота**, **механічна енергія**, **потужність**.

#### Механічна робота

міра дії сили на тіло:  $A = F s \cos \alpha$

#### Потужність

швидкість виконання роботи:  $P = \frac{A}{t}; P = F_x v$

#### Механічна енергія

характеризує здатність тіла виконувати роботу

Потенціальна енергія — енергія взаємодії

$E_p$  піднятого тіла:  $E_p = mgh$

$E_p$  пружно деформованого тіла:  $E_p = kx^2/2$

Кінетична енергія — енергія руху:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$

Закон збереження механічної енергії: у замкненій системі тіл, які взаємодіють тільки консервативними силами, повна механічна енергія зберігається:  $E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$

5. Ви сформулювали другий закон Ньютона «мовою» імпульсу та згадали закон збереження імпульсу.

Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили:  $\Delta \vec{p} = \vec{F}t$

імпульс тіла:  $\vec{p} = m \vec{v}$

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

імпульс сили:  $\vec{F}t$

Закон збереження імпульсу: у замкненій системі тіл геометрична сума імпульсів тіл системи залишається незмінною після будь-яких взаємодій тіл цієї системи ніж собою:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n$$

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I «МЕХАНІКА». Частина 2. Динаміка і закони збереження

*Завдання 1, 2, 4–6 містяТЬ тільки одну правильну відповідь.*

1. (1 бал) У якому випадку (рис. 1) тіло перебуває в стані нестійкої рівноваги?

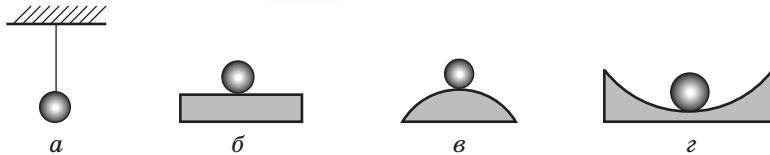


Рис. 1

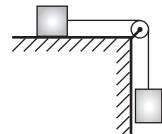


Рис. 2

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, визначте суму балів і поділіть її на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



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

# ЧАСТИНА 3. МЕХАНІЧНІ КОЛІВАННЯ І ХВИЛІ

## § 19. ВІДИ МЕХАНІЧНИХ КОЛІВАНЬ



Механічні коливання оточують нас усюди: погойдування гілля дерев, вібрація струн музичних інструментів, коливання поплавця на хвилі, рух маятника в годиннику, биття серця і т. д. Коливальний рух, один із найпоширеніших у природі, має низку характерних ознак, про які ви згадаєте в цьому параграфі.

**1**

### Які фізичні величини характеризують коливальний рух

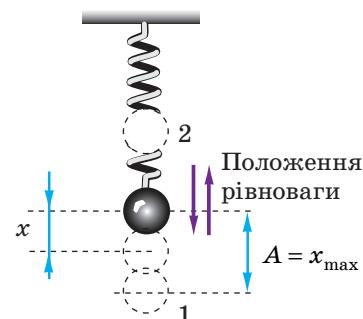
**Механічні коливання** — це рухи тіла (або системи тіл), які відбуваються біля певного положення рівноваги та які точно або приблизно повторюються через рівні інтервали часу.

Коливальний рух, як і будь-який інший рух, характеризується такими фізичними величинами, як **швидкість, прискорення, координата (зміщення)**.

**Зміщення  $x$**  — це відстань від положення рівноваги до точки, в якій у даний момент часу перебуває тіло, що коливається.

У ході коливань механічний стан тіла безперервно змінюється. Якщо координата, модуль і напрямок швидкості руху тіла повторюються через рівні інтервали часу, такі коливання називають **періодичними**.

Існує кілька фізичних величин, які характеризують саме періодичні коливання, зокрема **амплітуда, період, частота** (див. [рис. 19.1](#)).



**Рис. 19.1.** Тягарець на пружині здійснює періодичні коливання ( $x$  — зміщення тягарця;  $A$  — амплітуда коливань). Інтервал часу, за який тягарець перемістився з положення 2 і назад (час одного коливання), — період коливань  $T$

Амплітуда коливань $A$	Період коливань $T$	Частота коливань $v$
Найбільша відстань, на яку відхиляється тіло від положення рівноваги: $A = x_{\max}$	Час одного коливання: $T = \frac{t}{N}$ де $t$ — час спостереження; $N$ — кількість коливань за час $t$	Кількість коливань за одиницю часу: $v = \frac{N}{t}$
Одиниця амплітуди коливань у СІ — метр: $[A]=1$ м (m)	Одиниця періоду коливань у СІ — секунда: $[T]=1$ с (s)	Одиниця частоти коливань у СІ — герц: $[v]=1$ Гц (Hz).

## 2

**Незатухаючі та затухаючі коливання**

Розглянемо коливання тягарця на пружині (рис. 19.1). Якби в системі «тягарець — пружина — Земля» не було втрати механічної енергії, то коливання тривали б як завгодно довго, а їхня амплітуда з часом не змінювалася б.

Коливання, амплітуда яких із часом не змінюється, називають **незатухаючими**.

Проте в будь-якій системі завжди є втрати механічної енергії. Енергія витрачається на долання сил тертя, на деформацію тіл у ході коливань. У результаті механічна енергія поступово переходить у внутрішню. Тому, якщо система не отримує енергію ззовні, то амплітуда коливань поступово зменшується й коливання через деякий час припиняються (затухають).

Коливання, амплітуда яких із часом зменшується, називають **затухаючими**.

## 3

**Вільні та вимушені коливання, автоколивання**

Існують різні види механічних коливань.

Є коливання, які здатні відбуватися без зовнішнього періодичного впливу. Такими є, наприклад, коливання підвішеного на нитці або на пружині кульки, які виникають після того, як кульку відхилили від положення рівноваги й відпустили. Такі коливання називають **вільними**.

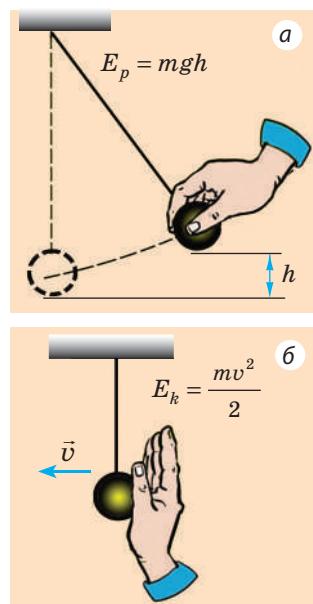
**Вільні коливання** — це коливання, які відбуваються під дією внутрішніх сил системи після того, як її було виведено з положення рівноваги.

Частота вільних коливань визначається властивостями самої системи (див. § 20).

Систему тіл, у якій можуть виникати вільні коливання, називають *коливальною системою*. Характерною рисою будь-якої коливальної системи є наявність у ній *позиція стійкої рівноваги*. Саме біля цього положення й відбуваються вільні коливання. Щоб у коливальній системі виникли вільні коливання, необхідне виконання двох умов:

- системі має бути передано надлишкову енергію (рис. 19.2);
- тертя в системі має бути досить малим, інакше коливання швидко затухнуть або навіть не виникнуть.

Оскільки в ході вільних коливань система не отримує енергію ззовні, то *вільні коливання* — це *завжди затухаючі коливання*. Чим більше тертя в системі, тим швидше затухають коливання. Наприклад, якщо те саме тіло змусити коливатися в повітрі й у воді, то в повітрі коливання відбуваються досить довго, а у воді швидко затухнуть. До речі, на цьому явищі базується робота гідролічних амортизаторів автомобілів (рис. 19.3).



**Рис. 19.2.** Щоб у коливальній системі виникли вільні коливання, необхідно вивести її з положення рівноваги: надати потенціальну (а) або кінетичну (б) енергію

Існують коливання (наприклад, рух повітря в духових інструментах, поршня — у двигуні внутрішнього згоряння), які здатні відбуватися тільки тоді, коли на тіло діють зовнішні сили, що періодично змінюються та змушують тіло здійснювати коливальний рух. Такі коливання називають *вимушеними*.

**Вимушенні коливання** — це коливання, які відбуваються в системі внаслідок дії зовнішньої сили, що періодично змінюється.

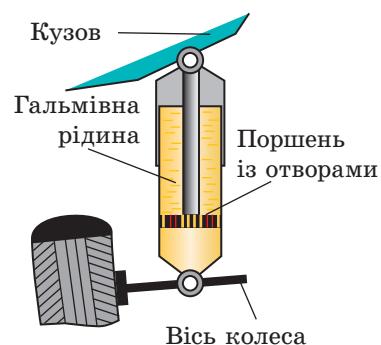
Яка сила, змінюючись періодично, змушує вашу долоню здійснювати вимушенні коливання (див. рис. 19.4)?

Вимушенні коливання — це зазвичай *незатухаючі коливання*, частота яких дорівнює частоті зміни зовнішньої сили, що змушує тіло коливатися.

Є системи, в яких незатухаючі коливання існують не завдяки періодичному зовнішньому впливу, а в результаті здатності таких систем самим регулювати надходження енергії від постійного (не періодичного) джерела. Такі системи називають *автоколивальними*, а незатухаючі коливання в таких системах — *автоколиваннями*.

Незатухаючі коливання, які відбуваються в системі за рахунок надходження енергії від постійного джерела, що регулюється самою системою, називають *автоколиваннями*.

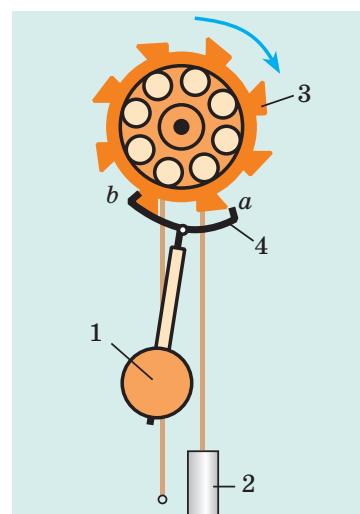
Частота автоколивань, як і частота вільних коливань, визначається властивостями самої системи. Прикладом механічної автоколивальної системи може бути храповий механізм маятникового годинника (рис. 19.5). Практично в будь-якій автоколивальній системі можна виділити три характерні елементи: *коливальну систему*, в якій можуть відбуватися вільні коливання (у нашому прикладі це маятник 1 годинника), *джерело енергії* (піднята гиря 2, яка повертає храпове колесо 3), *пристрій зворотного зв'язку*, що регулює надходження енергії від джерела певними порціями (анкер 4, через який маятник «керує», в який момент гиря передає енергію храповому колесу).



**Рис. 19.3.** Із кузовом автомобіля сполучають поршень, який під час коливань рухається в циліндрі, заповненому рідиною; значний опір рідини спричиняє затухання коливань



**Рис. 19.4.** До завдання в § 19



**Рис. 19.5.** Коли маятник 1 наближається до крайнього лівого положення, палет *b* чіпляється за зубець храпового колеса 3 і маятник зазнає поштовху вліво, отримуючи додаткову енергію

## 4

**Гармонічні коливання**

За характером залежності зміщення (координати) тіла від часу коливань розрізняють **гармонічні** і **негармонічні коливання**. Здебільшого залежність  $x(t)$  є досить складною (рис. 19.6).

Розглянемо графік коливань тіла на пружині (рис. 19.6, в). Крива, зображенна на графіку, — косинусоїда.

Коливання, під час яких координата  $x$  тіла, що коливається, змінюється з часом  $t$  за законом косинуса (або синуса), називають **гармонічними коливаннями**:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ або } x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Ці рівняння називають **рівняннями гармонічних коливань**. З'ясуємо, що означає в них кожна величина.

**$A$  — амплітуда коливань:**  $x_{\max} = A$  (оскільки найбільше значення косинуса та синуса дорівнює 1).

**$\omega t + \varphi_0$  — фаза коливань:**  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  — величина, що однозначно визначає механічний стан тіла в даний момент часу.

**$\varphi_0$  — початкова фаза коливань** — фаза коливань у момент початку відліку часу (якщо  $t = 0$ , то  $\varphi = \omega t + \varphi_0 = \varphi_0$ ).

**$\omega$  — циклічна частота коливань:**  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , де  $T$  — період коливань. (Косинус, як

і синус, — функція періодична, тобто  $\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\pi)$ ; коливання повністю повторюються через час, що дорівнює періоду  $T$  коливань, тому

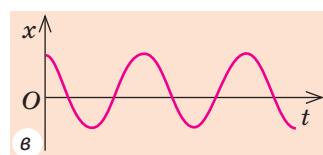
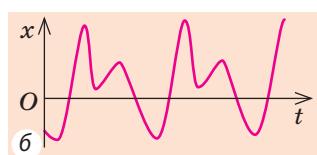
$\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega(t + T) + \varphi_0)$ . Таким чином:  $\omega t + \varphi_0 + 2\pi = \omega t + \omega T + \varphi_0 \Rightarrow \omega = 2\pi/T$ .)

**Одиниця циклічної частоти в СІ — радіан за секунду** (рад/с, або  $\text{с}^{-1}$ ) ( $\text{rad/s, s}^{-1}$ ).

Можна довести: коли координата тіла змінюється за гармонічним законом (за законом косинуса або синуса), швидкість і прискорення руху тіла теж змінюються гармонічно. При цьому виконуються співвідношення:

$$v_{\max} = \omega x_{\max}; a_{\max} = \omega^2 x_{\max}; a_x = -\omega^2 x$$

І навпаки: якщо в будь-який момент часу руху тіла його прискорення прямо пропорційне зміщенню та напрямлене в бік, протилежний зміщенню, то такий рух являє собою гармонічні коливання.



**Рис. 19.6.** Графіки залежності зміщення  $x$  тіла (або частини тіла) від часу  $t$  коливань: а — грудна клітина під час серцевих поштовхів (кардіограма); б — мембрана динаміка під час випромінювання звукової хвилі; в — тіло на пружині

## Зверніть увагу!

• Якщо початок відліку часу ( $t=0$ ) збігається з моментом максимального відхилення тіла від положення рівноваги ( $x_0=x_{\max}=A$ ), то рівняння коливань зручніше записувати у вигляді:  $x_0=A \cos \omega t$  (рис. 19.7, а).

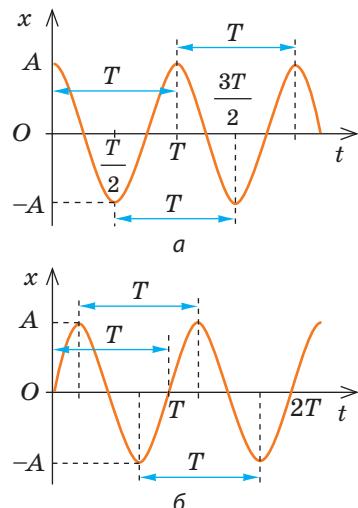
• Якщо початок відліку часу ( $t=0$ ) збігається з моментом проходження тілом положення рівноваги ( $x_0=0$ ), то рівняння коливань зручніше записувати у вигляді:  $x=A \sin \omega t$  (рис. 19.7, б).

• Із графіка коливань, як і з рівняння коливань, легко визначити всі фізичні величини, що характеризують коливальний рух (див. п. 5 § 19).

## 5

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** За наведеним графіком визначте амплітуду та період коливань тіла. Обчисліть циклічну частоту коливань і максимальну швидкість руху тіла. Запишіть рівняння коливань. Знайдіть зміщення тіла у фазі  $\frac{\pi}{2}$  рад.



**Рис. 19.7.** Графіки гармонічних коливань ( $A$  — амплітуда коливань;  $T$  — період коливань). Координата тіла, яке коливається, змінюється залежно від часу  $t$  за законом:  $x = A \cos \omega t$  (а);  $x = A \sin \omega t$  (б)

**Дано:**

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$A$  — ?

$T$  — ?

$\omega$  — ?

$v_{\max}$  — ?

$x(t)$  — ?

$$x\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right) — ?$$

**Розв'язання.** У момент початку спостереження ( $t=0$ ) тіло перебувало в положенні рівноваги ( $x_0=0$ ), тому рівняння коливань запишемо у вигляді:  $x = A \sin \omega t$ .

Із графіка бачимо: максимальне зміщення тіла дорівнює 5 см:

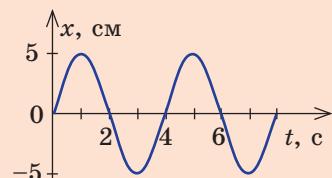
$A = x_{\max} = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$ ; тіло здійснює одне повне коливання за 4 с, отже,  $T=4$  с.

Обчислимо циклічну частоту коливань і максимальну швидкість руху тіла:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,5\pi \text{ (c}^{-1}\text{)}$ ;  $v_{\max} = \omega x_{\max} = 0,025\pi \text{ (м/с)}$ .

Підставивши значення  $A = 0,05 \text{ м}$  і  $\omega = 0,5\pi \text{ c}^{-1}$  у рівняння коливань, маємо:  $x = 0,05 \sin 0,5\pi t$  (м).

Якщо  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , то  $x = A \sin \varphi = 0,05 \sin \frac{\pi}{2} = 0,05$  (м).

**Відповідь:**  $A = 0,05 \text{ м}$ ;  $T = 4 \text{ с}$ ;  $\omega = 0,5\pi \text{ c}^{-1}$ ;  $v_{\max} = 0,025\pi \text{ м/с}$ ;  $x = 0,05 \sin 0,5\pi t$  (м);  $x = 0,05$  м.



## Підбиваємо підсумки

- Рухи, які точно або приблизно повторюються через одинакові інтервали часу, називають механічними коливаннями.
- Коливання, амплітуда яких із часом не змінюється, називають незатухаючими; коливання, амплітуда яких із часом зменшується, — затухаючими.

- Коливання, що відбуваються в системі внаслідок дії зовнішньої сили, яка періодично змінюється, називають вимушеними, а ті, що відбуваються під дією тільки внутрішніх сил системи, — вільними.
- Незатухаючі коливання, які відбуваються в системі за рахунок надходження енергії від постійного (не періодичного) джерела, що регулюється самою системою, називають автоколиваннями.
- Коливання, в ході яких зміщення  $x$  тіла, яке коливається, змінюється з часом  $t$  за законом косинуса (або синуса), називають гармонічними коливаннями. У загальному випадку рівняння гармонічних коливань має вигляд:  $x = A \cos(\omega t + \phi_0)$ , або  $x = A \sin(\omega t + \phi_0)$ , де  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega t + \phi_0$  — фаза коливань  $\phi$ ;  $\phi_0$  — початкова фаза;  $\omega$  — циклічна частота.

### Контрольні запитання



1. Назвіть основні фізичні величини, які характеризують коливальний рух. Дайте їх означення.
2. Чому за наявності тертя амплітуда вільних коливань поступово зменшується? Як називають такі коливання?
3. Які коливання називають вільними? вимушеними? Наведіть приклади.
4. Які умови необхідні для виникнення вільних коливань?
5. Назвіть характерні елементи автоколивальної системи.
6. У чому подібність вільних коливань і автоколивань? автоколивань і вимушених коливань? Чим вони відрізняються?
7. Які коливання називають гармонічними? Запишіть рівняння гармонічних коливань.
8. Який вигляд має графік гармонічних коливань?

### Вправа № 19



1. Згадайте приклади коливань із повсякденного життя. Які це коливання — затухаючі чи незатухаючі, вільні чи вимушенні? Обґрунтуйте свою відповідь.
2. Період коливань тягарця на пружині дорівнює 2 с. Що це означає? 1) Визначте частоту та циклічну частоту коливань тягарця. 2) Скільки коливань здійснить тягарець за 10 с? 3) Який шлях пройде тягарець за 3 с, якщо амплітуда коливань — 5 см?
3. Рівняння коливань тіла має вигляд  $x = 0,4 \sin \frac{2\pi}{3} t$  (м). Визначте амплітуду, період і частоту коливань тіла. Обчисліть максимальну швидкість і максимальне прискорення руху тіла.
4. Запишіть рівняння гармонічних коливань для тіла, якщо амплітуда його коливань 10 см, а період коливань — 1 с. Вважайте, що в момент початку спостереження тіло було максимально відхилене від положення рівноваги.
5. На рис. 1 і 2 наведено графіки гармонічних коливань деяких тіл. Для кожного тіла: а) визначте амплітуду коливань; б) період коливань; в) частоту коливань; г) запишіть рівняння коливань.
6. Доведіть, що серце й легені живих істот можна віднести до автоколивальних систем. Де в повсякденному житті ми зустрічаємося з автоколивальними системами? У разі необхідності скористайтесь додатковими джерелами інформації.

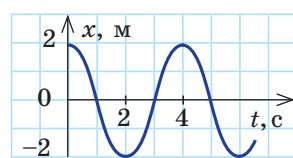


Рис. 1

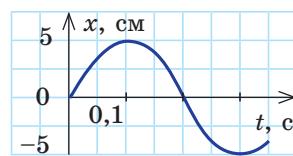


Рис. 2

## § 20. МАТЕМАТИЧНИЙ І ПРУЖИННИЙ МАЯТНИКИ. ЕНЕРГІЯ КОЛІВАНЬ



Коливальні рухи дуже різноманітні. Однак існує «класика» коливальних рухів — вони описані сотні років тому, їх вивченням займалися Галілео Галілей (1564–1642) і Крістіан Гюйгенс (1629–1695). Це — коливання пружинного та математичного маятників. Саме з коливаннями таких маятників ви ознайомитеся у цьому параграфі.

## 1

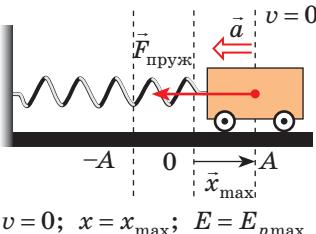
### Коливання пружинного маятника

**Пружинний маятник** — це коливальна система, яка являє собою тіло, зачіплене за один кінець пружини.

Розглянемо коливання *горизонтального пружинного маятника* — візка масою  $m$ , прикріпленого до вертикальної стіни пружиною жорсткістю  $k$ . Будемо вважати, що сили тертя, які діють у системі, нехтівно малі, тоді коливання маятника будуть незатухаючими (їх амплітуда з часом не змінюватиметься, а повна механічна енергія системи зберігатиметься). При цьому потенціальна енергія деформованої пружини буде перетворюватися на кінетичну енергію руху візка, і навпаки.

#### Коливання пружинного маятника

1. Стан максимального відхилення від положення рівноваги



$$v = 0; \quad x = x_{\max}; \quad E = E_{p\max}$$

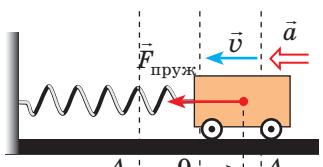
Відведемо візок на відстань  $x_{\max}$  вправо від положення рівноваги — пружина розтягнена, і на візок діє сила пружності, напрямлена вліво; у даний момент ця сила максимальна:

$$F_{\text{пруж}} = kx_{\max}$$

Візок нерухомий, тому його кінетична енергія дорівнює нулю:  $E_k = 0$ . Потенціальна енергія пружини максимальна і дорівнює повній енергії маятника:

$$E_p = \frac{kx_{\max}^2}{2}$$

2. Прискорений рух візка, швидкість руху збільшується

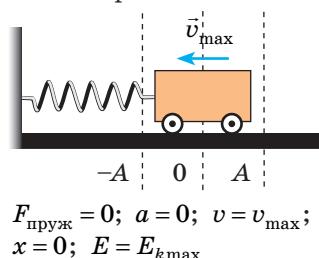


$$v \uparrow; \quad x \downarrow; \quad F_{\text{пруж}} \downarrow \Rightarrow a \downarrow; \quad E = E_k + E_p$$

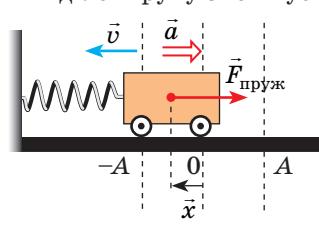
Відпустимо візок — під дією сили пружності він починає рухатися вліво. Сила  $F_{\text{пруж}}$  напрямлена в бік руху візка, тому швидкість його руху збільшується. Натомість видовження  $x$  пружини зменшується, тому меншатиме її сила пружності, а отже, і прискорення руху візка

Кінетична енергія візка зростає:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ . Потенціальна енергія пружини зменшується:  $E_p = \frac{kx^2}{2}$ . Повна енергія системи залишається незмінною і дорівнює сумі кінетичної та потенціальної енергій

## 3. Стан рівноваги

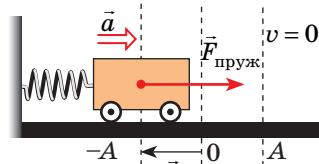


## 4. Сповільнений рух візка, швидкість руху зменшується



$$v \downarrow; x \uparrow; F_{\text{пруж}} \uparrow \Rightarrow a \uparrow; \\ E = E_k + E_p$$

## 5. Стан максимального відхилення від положення рівноваги



$$v = 0; |x| = x_{\text{max}}; \\ F_{\text{пруж}} = kx_{\text{max}}; E = E_{p\text{max}}$$

Через час, який дорівнює чверті періоду ( $t = T/4$ ), візок доходить до положення рівноваги. У цей момент сила пружності та прискорення дорівнюють нулю, а швидкість руху візка сягає максимального значення

Потенціальна енергія пружини дорівнює нулю:  $E_p = 0$ . Кінетична енергія візка максимальна й дорівнює повній енергії системи:

$$E_k = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

Досягнувши положення рівноваги, візок не зупиняється, а внаслідок *інертності* продовжує рух вліво.

Пружина починає стискатися, і зростаюча сила пружності гальмує рух візка

Кінетична енергія візка зменшується:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенціальна енергія пружини зростає:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Повна енергія системи дорівнює сумі кінетичної та потенціальної енергій

Досягнувши точки повороту (максимального відхилення від положення рівноваги), візок на мить зупиняється. У цей момент сила пружності сягає максимального значення. Від моменту початку коливання пройшла половина періоду ( $t = T/2$ )

Візок нерухомий, тому його кінетична енергія дорівнює нулю:  $E_k = 0$ . Потенціальна енергія пружини максимальна і дорівнює повній енергії маятника:

$$E_p = \frac{kx_{\text{max}}^2}{2}$$

Наступну половину періоду характер руху візка буде таким самим, тільки у зворотному напрямку: візок почне рухатися вправо до положення рівноваги, збільшуючи швидкість; через час  $t = \frac{3}{4}T$  від початку коливання він пройде положення рівноваги й далі знову відхилиться на відстань  $x_{\text{max}}$ . Так завершиться одне повне коливання ( $t = T$ ). Далі все повториться.

**Зверніть увагу!** Протягом усього часу коливання сила пружності направлена в бік, протилежний зміщенню візка, — весь час сила пружності «штовхає» візок до положення рівноваги.

Отже, *вільні коливання пружинного маятника мають такі причини:*

1) сила, що діє на тіло, завжди направлена до положення рівноваги;

2) тіло, що коливається, є *інертним*, тому воно не зупиняється в положенні рівноваги (коли рівнодійна сила стає рівною нулю), а продовжує рух у тому самому напрямку.

2

### Як визначити період коливань пружинного маятника

Розглянемо коливання візка, закріпленого на горизонтальній пружині, з точки зору другого закону Ньютона (рис. 20.1). Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді:  $\vec{F}_{\text{пруж}} + m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$ .

Сила тяжіння та сила нормальної реакції опори зрівноважують одну одну, тому  $\vec{F}_{\text{пруж}} = m\vec{a}$ . Спроектувавши це рівняння на вісь  $OX$  ( $F_{\text{пруж}x} = ma_x$ ) і скориставшись законом Гука ( $F_{\text{пруж}x} = -kx$ ), отримаємо:  $a_x = -\frac{k}{m}x$ .

Бачимо, що це рівняння можна записати у вигляді  $a_x = -\omega^2 x$ . Таким чином, коливання візка на пружині є гармонічними коливаннями, а циклічна частота цих коливань становить:  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Уявивши до уваги, що  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , отримаємо формулу для обчислення періоду коливань пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

*Зверніть увагу! Період коливань пружинного маятника не залежить ані від амплітуди коливань, ані від того, де відбуваються ці коливання (на поверхні Землі, у космічному кораблі чи на поверхні Місяця), — він визначається тільки власними характеристиками коливальної системи «тіло — пружина». Якщо період  $T$  коливань тіла та жорсткість  $k$  пружини відомі, можна знайти масу  $m$  тіла. Такий спосіб визначення маси використовують у стані невагомості, коли звичайні ваги не працюють.*

3

### Що називають математичним маятником

Будь-яке тверде тіло, яке здійснює або може здійснювати коливання відносно осі, що проходить через точку підвісу, називають фізичним маятником. Прикладом може слугувати іграшка, підвішена на нитці в салоні автомобіля. Якщо іграшку вивести з положення рівноваги, вона почне коливатися. Проте вивчати такі коливання доволі складно: їх характер визначається розмірами та формою іграшки, властивостями нитки та іншими чинниками.

Щоб розміри тіла не впливали на характер його коливань, слід узяти нитку, довжина якої набагато більша за розміри тіла, а маса незначна порівняно з його масою. У такому випадку тіло можна вважати матеріальною точкою. А щоб під час коливань тіло весь час перебувало на однаковій відстані від точки підвісу, нитка має бути нерозтяжною. У такий спосіб буде створено фізичну модель — математичний маятник.

**Математичний маятник** — це фізична модель коливальної системи, яка складається з матеріальної точки, підвішеної на невагомій і нерозтяжній нитці, та гравітаційного поля.

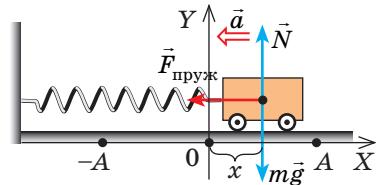
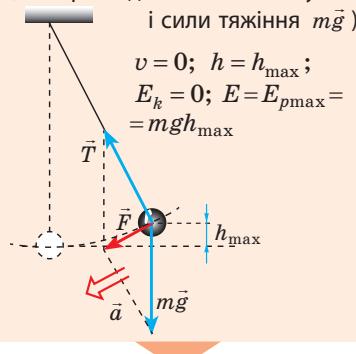


Рис. 20.1. На візок, відхиленій від положення рівноваги, діють три сили: сила реакції опори  $\vec{N}$ , сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила пружності  $\vec{F}_{\text{пруж}}$

1. Стан максимального відхилення від положення рівноваги ( $\vec{F}$  — рівнодійна сила натягу  $\vec{T}$  і сили тяжіння  $m\vec{g}$ )

$$v = 0; h = h_{\max}; E_k = 0; E = E_{p\max} = mgh_{\max}$$



2. Прискорений рух кульки, швидкість руху збільшується

$$v \uparrow; h \downarrow; E_k = \frac{mv^2}{2}; E_p = mgh; E = E_k + E_p$$



3. Стан рівноваги

$$v = v_{\max}; h = 0; F = 0; E_p = 0; E = E_{k\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

$t = T/4$

#### 4. Коливання математичного маятника

Візьмемо невелику, але досить важку кульку та підвісимо її на довгій нерозтяжній нитці — такий маятник можна вважати математичним. Якщо відхилити кульку від положення рівноваги та відпустити, то внаслідок дії гравітаційного поля Землі (сили тяжіння) та сили натягу нитки кулька почне коливатися біля положення рівноваги. Оскільки опір повітря нехтівно малий, а сили, що діють у системі, є консервативними, повна механічна енергія кульки буде зберігатися. При цьому потенціальна енергія піднятої кульки буде перетворюватися на її кінетичну енергію, і навпаки.

Розгляніть коливальний рух кульки (рис. 20.2), поясніть причини її руху та з'ясуйте, які перетворення енергії відбуваються.

#### 5. Як обчислити період коливань математичного маятника

Можна довести, що математичний маятник, відхилений від положення рівноваги на невеликий кут ( $3-5^\circ$ ), здійснюватиме гармонічні коливання, тобто прискорення його руху весь час буде прямо пропорційне зміщенню та напрямлене в бік, протилежний зміщенню:  $a_x = -\omega^2 x$ .

4. Сповільнений рух кульки, швидкість руху зменшується

$$v \downarrow; h \uparrow; E_k = \frac{mv^2}{2}; E_p = \frac{kx^2}{2}; E = E_k + E_p$$

$t = T/2$

5. Стан максимального відхилення від положення рівноваги

$$v = 0; h = h_{\max}; E_k = 0; E = E_{p\max} = mgh_{\max}$$

$t = T/2$

**Рис. 20.2.** Коливання математичного маятника є вільними, оскільки відбуваються під дією внутрішніх сил системи. Причини, завдяки яким математичний маятник здійснює вільні коливання, ті самі, що й у випадку коливань пружинного маятника: 1) рівнодійна сил, прикладених до тіла, завжди напрямлена до положення рівноваги; 2) тіло, що коливається, є інертним

Для математичного маятника  $\omega^2 = \frac{g}{l}$ , тому циклічна частота  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ . Отже, **період коливань математичного маятника** обчислюють за формулою:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

де  $l$  — довжина маятника;  $g$  — прискорення вільного падіння.

Цю формулу вперше одержав у XVII ст. голландський учений *Крістіан Гюйгенс*, тому її називають **формулою Гюйгенса**.

Період коливань математичного маятника не залежить від маси маятника, а визначається лише довжиною нитки та прискоренням вільного падіння в тому місці, де розташований цей маятник. Тому, вимірювши довжину нитки та період коливань маятника, можна визначити прискорення вільного падіння в даній місцевості (див. лабораторну роботу № 5).

### 6 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Рівняння коливань тягара на пружині має вигляд:  $x = 10 \cos 2\pi t$  (см). Знайдіть повну механічну енергію коливань, найбільшу швидкість руху тягара, кінетичну та потенціальну енергії системи через  $\frac{1}{6}$  с після початку відліку часу. Маса тягара — 1 кг. Систему вважайте замкненою.

**Дано:**

$$x = 10 \cos 2\pi t \text{ (см)}$$

$$t = \frac{1}{6} \text{ с}$$

$$m = 1,0 \text{ кг}$$

$$E = ? \quad v_{\max} = ? \\ E_k = ? \quad E_p = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.** Система замкнена, тому справдіжується закон збереження повної механічної енергії:

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = E_k + E_p.$$

Зіставимо рівняння коливань у загальному вигляді з рівнянням, наведеним у задачі:  $x = A \cos \omega t$ ,  $x = 0,1 \cos 2\pi t \Rightarrow A = 0,1 \text{ м}; \omega = 2\pi \text{ с}^{-1}$ .

Оскільки  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , то  $k = \omega^2 m = 4\pi^2 \cdot 1 \approx 40 \text{ (Н/м)}$ ;  $E = E_{p\max} = \frac{kA^2}{2} = 0,20 \text{ (Дж)}$ ;

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} \Rightarrow v_{\max} = \sqrt{\frac{kA^2}{m}} = A\sqrt{\frac{k}{m}} = A\omega = 0,1 \cdot 2\pi \approx 0,63 \text{ (м/с)}.$$

Визначивши видовження пружини через  $t = \frac{1}{6} \text{ с}$ , обчислимо потенціальну і кінетичну енергії пружини:  $x = 0,1 \cos 2\pi t = 0,1 \cos 2\pi \cdot \frac{1}{6} = 0,1 \cos \frac{\pi}{3} = 0,05 \text{ (м)}$ ;

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{40 \cdot 0,0025}{2} = 0,05 \text{ (Дж)}; E = E_k + E_p \Rightarrow E_k = E - E_p = 0,20 - 0,05 = 0,15 \text{ (Дж)}.$$

**Відповідь:**  $E = 0,20 \text{ Дж}$ ;  $v_{\max} = 0,63 \text{ м/с}$ ;  $E_k = 0,15 \text{ Дж}$ ;  $E_p = 0,05 \text{ Дж}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Пружинний маятник — коливальна система, яка являє собою тіло, закріплене на пружині. Період вільних коливань пружинного маятника не залежить від амплітуди коливань і визначається за формулою:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ .

- Математичний маятник — це фізична модель коливальної системи, яка складається з матеріальної точки, що підвішена на невагомій і нерозтяжній нитці, та гравітаційного поля. Період коливань математичного маятника не залежить від його маси та амплітуди коливань і визначається за формулою:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ .

- У ході вільних коливань маятника його потенціальна та кінетична енергії безперервно змінюються. Потенціальна енергія є максимальною в точках повороту й дорівнює нулю в момент проходження маятником положення рівноваги. Кінетична енергія в точках повороту дорівнює нулю й сягає максимального значення в момент проходження маятником положення рівноваги.

### Контрольні запитання



1. Опишіть коливання пружинного маятника. Чому тіло не зупиняється, коли проходить положення рівноваги? 2. За якою формулою визначають період коливань пружинного маятника? 3. Дайте означення математичного маятника.
4. Опишіть коливання математичного маятника. За якою формулою визначають період його коливань? 5. Які перетворення енергії відбуваються під час коливань пружинного маятника? математичного маятника? 6. У якому положенні потенціальна енергія маятника сягає максимального значення? мінімального? Що можна сказати про кінетичну енергію маятника в ці моменти?

### Вправа № 20



1. У системі «візок — пружина» відбуваються вільні коливання. Збільшиться чи зменшиться період цих коливань, якщо: 1) збільшити амплітуду коливань? 2) зменшити масу візка? 3) збільшити жорсткість пружини?
2. Чи відбуватимуться коливання математичного маятника в невагомості? Відповідь обґрунтуйте.
3. Як зміниться хід маятникового годинника, якщо його з теплої кімнати винести в холодну комору? підняти з першого поверху хмарочоса на дах?
4. Якою є маса тіла, підвішеного на пружині жорсткістю 40 Н/м, якщо після відхилення тіла від положення рівноваги воно здійснює 8 коливань за 12 с?
5. На яку максимальну висоту відхиляється математичний маятник, якщо в момент проходження положення рівноваги він рухається зі швидкістю 0,2 м/с? Якою є довжина маятника, якщо період його коливань — 2 с?
6. Рівняння коливань пружинного маятника масою 5 кг має вигляд:  $x = 0,2\cos 10\pi t$ . Визначте: 1) циклічну частоту та період коливань маятника; 2) жорсткість пружини маятника; 3) повну механічну енергію коливань; 4) зміщення, кінетичну та потенціальну енергії маятника через 0,025 с.
7. Спостерігаючи коливання великої люстри в Пізанському кафедральному соборі, яка розгойдувалася через протяг, Г. Галілей вимірював період її коливань і встановив... Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь: 1) що встановив Г. Галілей; 2) як він вимірював період коливань без годинника; 3) яким є період коливань великої люстри (для цього знайдіть інформацію про довжину підвісу).

### Експериментальне завдання



Виготовте маятник, закріпивши на довгій нитці достатньо важке тіло, і виміряйте прискорення вільного падіння у вашому будинку. Переконайтесь, що воно дійсно приблизно дорівнює  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

## § 21. РЕЗОНАНС



1750 р. біля міста Анже (Франція) ланцюговим мостом завдовжки 102 м ішли в ногу солдати. У результаті розмах коливань мосту збільшився настільки, що ланцюги обірвались і міст упав у річку. У 1830 р. з аналогічної причини зруйнувався підвісний міст у м. Манчестер (Велика Британія). У 1940 р. через пориви вітру зруйнувався Такомський міст у США. Ці події — класичні приклади прояву резонансу в коливальних системах. Що ж таке резонанс? Коли його прояви корисні, а коли шкідливі?

### 1 Чому для підтримування коливань потрібно постачати енергію

Якщо коливальну систему вивести з положення рівноваги, то в ній виникнуть вільні коливання, частота яких не залежить від амплітуди. *Частоту вільних коливань називають власною частотою коливань системи.* Через втрати енергії *вільні коливання є затухаючими.* Щоб коливання не затухали, необхідно, щоб у систему періодично надходила енергія ззовні.

Наведемо приклад. Напевно, всі ви гойдалися на гойдалці. Коли ви були маленькими, вас розгойдували дорослі, пізніше ви навчилися розгойдуватися самі. Розгойдувшись на гойдалці (а гойдалка — це фізичний маятник), ви за рахунок роботи м'язів періодично передаєте коливальній системі «гойдалка» енергію.

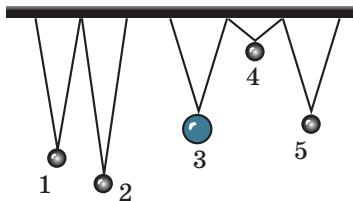
Якщо енергії, яка надходить у систему, недостатньо для того, щоб відновити втрати на тертя, то амплітуда коливань гойдалки зменшуватиметься доти, доки коливання усталяться. *Під час усталених коливань втрати енергії системи дорівнюють енергії, яка надходить у систему* (у даному випадку — в результаті роботи ваших м'язів). Якщо ж енергії надходить більше, ніж витрачається на тертя, то амплітуда коливань буде збільшуватись. Однак зі збільшенням амплітуди будуть збільшуватись і втрати енергії, тому через деякий час коливання знов усталяться — гойдалка знову буде коливатися з незмінною амплітудою, тільки більшою, ніж раніше.

Ви можете розгойдувати гойдалку й так: стати на землю й рухати гойдалку вперед-назад із частотою, що не дорівнює власній частоті коливань гойдалки. Гойдалка буде коливатися, здійснюючи *вимушені коливання, частота яких дорівнює частоті змінення змушувальної сили* (сили пружності з боку ваших рук), проте навряд чи вам вистачить зусиль, щоб домогтися досить великої амплітуди коливань.

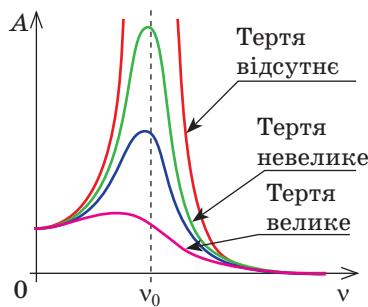
### 2 У чому причина виникнення резонансу

Розгойдувати гойдалку, рухаючи її вперед-назад із довільною частотою, ви будете хіба що заради фізичного експерименту, адже ваш життєвий досвід підказує: потрібно діяти *в такт* із власними коливаннями гойдалки. Амплітуда коливань швидко збільшиться, якщо частота зовнішньої змінної сили збігатиметься з частотою вільних коливань гойдалки.

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань, якщо частота зовнішньої сили, що періодично змінюється, збігається з власною частотою коливань системи, називають **резонансом**.



**Рис. 21.1.** Дослід із вивчення явища резонансу. Кулька 3 (найважча) і кулька 5 підвішена на нитках однакової довжини



**Рис. 21.2.** Графіки залежності амплітуди  $A$  коливань від частоти  $v$  зовнішньої змінної сили за різних сил тертя;  $v_0$  — власна частота коливань системи

Явище резонансу весь час додатна, амплітуда коливань швидко зростає і амплітуда коливань напрямок зовнішньої сили збігається з напрямком руху маятника, тому робота зовнішньої сили є незначною, тому невеликою є амплітуда усталених коливань.

Якщо частота змінення зовнішньої сили збігається з власною частотою коливань маятника ( $v = v_0$ ), то протягом усього часу коливань напрямок зовнішньої сили збігається з напрямком руху маятника, тому робота зовнішньої сили є незначною, тому невеликою є амплітуда усталених коливань.

Явище резонансу зручно описувати за допомогою графіків.

Графік залежності амплітуди вимушених коливань від частоти змінення зовнішньої сили називають **резонансною кривою**.

На рис. 21.2 подано резонансні криві за різних сил тертя. Аналізуючи графіки, можна дійти висновків: 1) найбільша амплітуда коливань досягається тоді, коли частота зовнішньої змінної сили збігається з власною частотою коливань системи ( $v = v_0$ ); 2) чим більша в системі сила тертя, тим меншим є пік резонансної кривої, тобто тим слабше виражений резонанс.

### 3 Як боротися з проявами резонансу і де застосовують резонанс

Практично всі фізичні об'єкти здатні здійснювати вільні коливання. Зовнішні періодичні впливи на такі об'єкти можуть спричинити явище резонансу й привести до руйнувань. На початку параграфа вже йшлося про випадки з руйнуванням мостів. Також відомі випадки руйнування літаків, коли амплітуда коливань крил літака різко збільшувалася через дію

турбулентних потоків повітря. Під час руху потяга частота ударів коліс на стиках рейок іноді збігається з частотою вільних коливань вагона на ресорах, тоді вагон починає сильно розгойдуватись і виникає небезпека аварії.

Як запобігти шкідливим проявам резонансу? Проаналізувавши графіки на рис. 21.2, можна запропонувати збільшити силу тертя, однак це призведе до небажаних втрат енергії. Тому частіше застосовують інші способи — змінюють власну частоту коливань системи або частоту зовнішньої змінної сили. Так, щоб вирішити зазначену проблему з літаками, просто зробили важчими їх крила: частота власних коливань крил змінилась і припинила збігатися з частотою коливань зовнішньої сили. Для потягів розраховують небажану швидкість руху; по мостах забороняють ходити стрійовим кроком; споруджуючи будинки, враховують частоту коливань земної кори в разі землетрусу, і т. д.



Якщо нести відра з водою, то за деякої швидкості руху вода починає вихлюпуватися. Що потрібно зробити, щоб це припинити?

Явище резонансу може приносити й користь. Так, завдяки резонансу легко розгойдати гойдалку або виштовхнути застриглий автомобіль. Резонанс використовують у роботі вібромашин у гірничодобувній промисловості, застосовують в акустиці, медицині, для приймання та передавання радіосигналів тощо. Вивчаючи фізику, ви ще не раз зустрінетесь із застосуванням резонансу.



### Підбиваємо підсумки

- Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань, якщо частота зовнішньої сили, що періодично змінюється, збігається із власною частотою коливань системи, називають резонансом.
- Графік залежності амплітуди вимушених коливань від частоти зовнішньої змінної сили називають резонансною кривою. Чим більша в системі сила тертя, тим меншим є пік резонансної кривої, тобто тим слабше виражений резонанс.



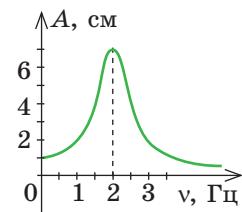
### Контрольні запитання

1. Дайте означення резонансу. Наведіть приклади його прояву. 2. Що таке резонансна крива? Які висновки можна зробити внаслідок її аналізу? 3. Як боротися з небажаними проявами резонансу? Де застосовують резонанс?



### Вправа № 21

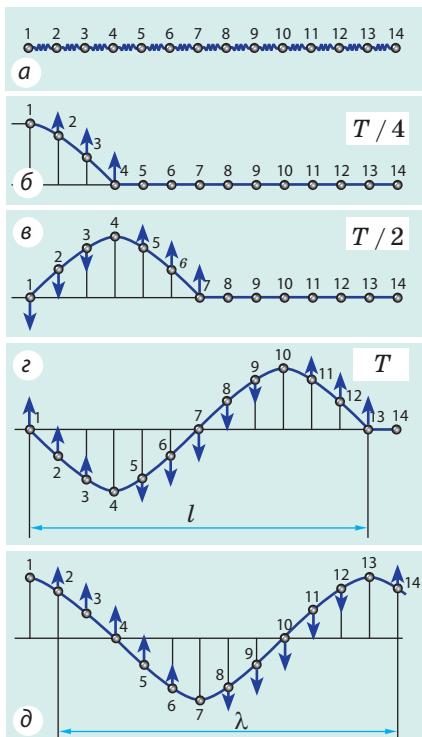
1. Коли повз будинок проходить транспорт, шибки іноді дзеленчать. Чому?
2. До пружинного маятника масою 0,5 кг прикладено силу, що змінюється з частотою 10 Гц. Чи виникне резонанс, якщо жорсткість пружини  $200 \text{ Н/м}$ ?
3. За якої мінімальної швидкості руху потяга виникне резонанс, якщо довжина залізничної рейки 25 м, а період власних коливань вагона — 1,25 с?
4. На рисунку подано резонансну криву пружинного маятника масою 1 кг. Визначте жорсткість пружини.
5. У вагоні потяга підвішено на нитці завдовжки 40 см невеликий тягарець. Якою є швидкість руху потяга в той момент, коли тягарець починає розгойдуватись особливо інтенсивно? Довжина залізничної рейки — 25 м.



## § 22. МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ



Якщо, виникнувши в одному місці, коливання поширюються в сусідні ділянки простору, говорять про хвильовий рух — хвилі. Унаслідок підземних поштовхів поширюються сейсмічні хвилі в земній корі — виникають землетруси та цунамі; коливання дифузора гучномовця викликають появу звукових хвиль, і ми чуємо звук; коливання серця є причиною коливань стінок артерії (пульс). Згадаємо особливості хвильового руху.



**Рис. 22.1.** Механізм поширення по-перечної хвилі. Сині стрілки показу-ють напрямок і відбивають модуль швидкості руху (чим довша стрілка, тим більшою є швидкість руху);  $\lambda$  — довжина хвилі

Якщо надати кульці 1 коливального руху, то кулька 2 теж почне коливатись, але з деяким запізненням; коливання кульки 2 спричиняють коливання кульки 3, далі кульки 4 і т. д. (рис. 22.1, б–д). Зрештою всі кульки почнуть рух і будуть коливатися з тією самою частотою, що й кулька 1, однак їхні коливання відрізнятимуться фазою.

\* Розглядаючи механічні хвилі, частинками будемо називати не молекули, атоми, іони, а невеликі фрагменти (ділянки) середовища.

### 1 Як поширюється механічна хвилі

Поширення в просторі коливань речо-вина або поля називають **хвилею**.

За фізичною природою розрізняють **електромагнітні хвилі** (наприклад, радіо-хвилі, світло) і **механічні хвилі**.

**Механічна хвилі** — це поширення коли-вань у пружному середовищі.

Середовище називають **пружним**, якщо під час його деформації виникають сили, які протидіють цій деформації, — сили пружності.

Якщо одному кінцю гімнастичної стрічки надати коливального руху, до цього руху будуть поступово залучатися все більш віддалені точки стрічки, — стрічкою побіжить хвилі. Розглянемо процес поширення такої хвилі на моделі: подамо стрічку у вигляді системи однакових кульок (кульки моделюють частинки\* стрічки), з'єднаних невагомими пружинами, які моделюють пружну взаємодію частинок (рис. 22.1, а).

Якщо відхилити кульку 1 від по-ло-ження рівноваги, пружина розтягнеться і на кульку 2 почне діяти сила пруж-ності; у результаті кулька 2 теж почне рух. Кулька інертна, тому її рух почнеться не відразу, а через деякий інтервал часу.

У загальному вигляді механізм поширення пружної хвилі є таким. Тіло, що коливається в пружному середовищі, — джерело хвилі — деформує прилеглі до нього шари середовища (у такт своїм коливанням стискає та розтягує або зсувує їх). Сили пружності, що виникають у результаті деформації, діють на наступні шари середовища, спонукаючи їх теж здійснювати *вимушені коливання*. Поступово, один за одним, усі шари середовища долучаються до коливального руху — середовищем поширюється хвилі.

## 2 Властивості хвильового руху

1. *Хвилі поширюються в середовищі зі скінченою швидкістю*: коливальний рух від однієї точки середовища до іншої передається не миттєво, а з певним запізненням.

2. *Джерелом механічних хвиль завжди є тіло, що коливається*; оскільки коливання частинок середовища в ході поширення хвилі є вимушеними, то *частота коливань кожної частинки дорівнює частоті коливань джерела хвилі*.

3. *Механічні хвилі не можуть поширюватись у вакуумі*.

4. *Хвильовий рух не супроводжується перенесенням речовини* — частинки середовища тільки коливаються біля деяких положень рівноваги.

5. Із приходом хвилі частинки середовища починають рухатися (набувають кінетичної енергії). Це означає, що *під час поширення хвилі відбувається перенесення енергії*. *Перенесення енергії без перенесення речовини — найважливіша властивість будь-якої хвилі*.



Рис. 22.2. До завдання в § 22



Згадайте поширення хвиль на поверхні моря (рис. 22.2). Чи рухатиметься людина разом із гребенями хвиль, наприклад, до берега? А як вона рухатиметься? Чому?

## 3 Фізичні величини, які характеризують хвилю

Хвіля — це поширення коливань, тому фізичні величини, які характеризують коливання (*частота  $v$ , період  $T$ , амплітуда  $A$  коливань*), характеризують і хвілю. Ще двома важливими характеристиками хвилі є *довжина  $\lambda$  хвилі* і *швидкість  $v$  поширення хвилі*.

Швидкістю поширення хвилі називають швидкість переміщення точок із однаковою фазою коливань (наприклад, швидкість переміщення гребеня хвилі). Швидкість поширення хвилі не збігається зі швидкістю руху частинок середовища: частинки коливаються біля положень рівноваги, а хвіля поширюється в певному напрямку.

Повернемося до рис. 22.1. Нехай кулька 1 здійснила одне коливання, тобто час її руху дорівнює одному періоду ( $t = T$ ). За цей час хвіля поширилася до кульки 13. Неважко помітити, що надалі кульки 1 і 13 коливатимуться абсолютно однаково — синхронно, в однаковій фазі. Очевидно, що однаково коливатимуться також кульки 2 і 14, 3 і 15 і т. д.

**Довжина хвилі**  $\lambda$  — це відстань між двома найближчими точками, які коливаються синхронно; відстань, на яку поширюється хвіля за час, що дорівнює періоду  $T$ :

$$\lambda = vT$$

*Одиниця довжини хвилі в СІ — метр:  $[\lambda] = 1 \text{ м (м)}$ .*

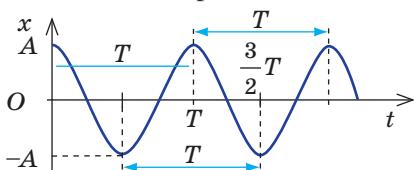
Урахувавши, що  $T = 1/v$ , отримаємо формулу взаємозв'язку довжини, частоти та швидкості поширення хвилі — **формулу хвилі**:

$$v = \lambda\nu$$

*Зверніть увагу! Швидкість поширення хвилі в основному визначається пружними властивостями середовища, в якому хвіля поширюється, тому, якщо хвіля переходить із одного середовища в інше, то швидкість її поширення змінюється, а от частота хвилі залишається незмінною, оскільки вона визначається частотою коливань джерела хвилі. Отже, відповідно до формул хвилі в разі переходу хвилі з одного середовища в інше довжина хвилі змінюється.*

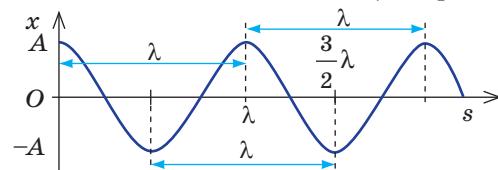
*Хвіля періодична в часі та в просторі. Що це означає?*

Будь-яка частинка середовища, де поширюється хвіля, здійснює періодичні коливання в часі: через певний інтервал часу  $T$  коливання частинки повторюються.



Період  $T$  — характеристика періодичності хвилі в часі.

Якщо зафіксувати певний момент часу, то через відстань, яка дорівнює довжині  $\lambda$  хвилі, форма хвилі повториться. Частинки, розташовані на відстані  $\lambda$  одна від одної, коливаються однаково (синхронно).

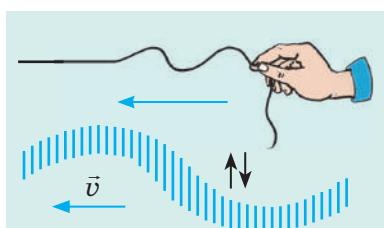


Довжина  $\lambda$  хвилі — характеристика періодичності хвилі в просторі.

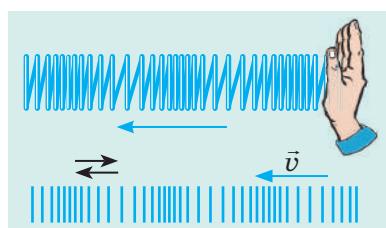
#### 4 Які існують види механічних хвиль

Із курсу фізики 9 класу ви знаєте, що за напрямком руху частинок середовища відносно напрямку поширення хвилі розрізняють **поздовжні та поперечні хвилі**.

**Поперечна хвіля** — хвіля, в якій частинки середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі



**Поздовжня хвіля** — хвіля, в якій частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі



У поперечній хвилі відбувається почерговий зсув одних шарів середовища відносно інших. Деформація зсуву спричиняє появу сил пружності тільки у твердих тілах, тому *поперечні хвилі можуть поширюватися тільки у твердих тілах*.

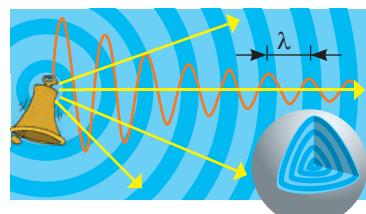
Хвилі на поверхні води не є ані поздовжніми, ані поперечними. Це хвилі *змішаного типу*. Частинки води переміщуються як уздовж напрямку поширення хвилі, так і перпендикулярно до нього. У загальному випадку частинки рухаються по еліпсах.



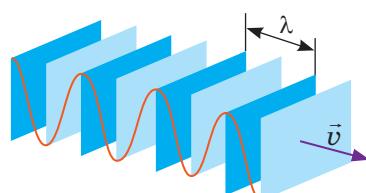
Хвилі, які поширюються шнуром, стрічкою або пружиною, можуть поширюватися тільки в двох напрямках — уздовж шнура (стрічки, пружини). А от якщо джерело хвилі коливається всередині середовища, хвилі поширюються в усі боки та захоплює дедалі більше точок простору, які утворюють певну поверхню. *Поверхню, до якої дійшли коливання на даний момент, називають фронтом хвилі.*

Усі частинки фронту хвилі коливаються однаково (в одній фазі). *Поверхні однієї фази називають хвильовими поверхнями.* Отже, фронт хвилі — це гранична хвильова поверхня. За формую хвильової поверхні розрізняють *сферичні, циліндричні, плоскі хвилі.*

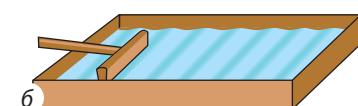
**Сферична хвilia** (рис. 22.3) виникає, якщо джерелом хвилі є матеріальна точка або сфера, що пульсуює. У цьому випадку енергія, яку прилеглі шари середовища отримали від джерела хвилі, розподіляється по дедалі більшій площині, тому зі збільшенням відстані від джерела амплітуда хвилі зменшується.



**Рис. 22.3.** Хвильові поверхні сферичної хвилі — сфери; зі збільшенням відстані від джерела амплітуда хвилі зменшується

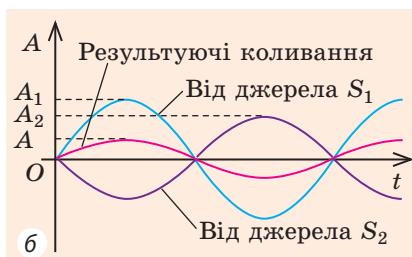
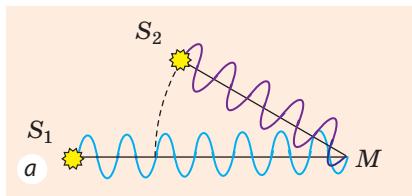


**Рис. 22.4.** Хвильові поверхні плоскої повздовжньої хвилі. Синім показано області найбільшого стиснення середовища, блакитним — найменшого

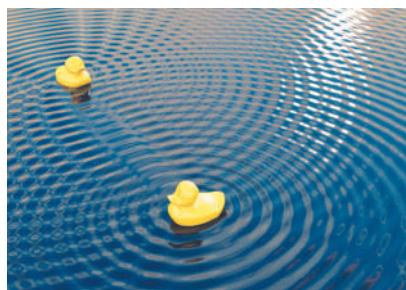


**Рис. 22.5.** Хвилі на поверхні рідини: колова хвilia (а); плоска хвilia (б)

Як буде змінюватися амплітуда хвилі на поверхні рідини (рис. 22.5) у випадку колової хвилі? плоскої хвилі?



**Рис. 22.6.** Якщо хвилі надійшли в точку  $M$  у протилежних фазах, амплітуда результуючих коливань зменшується:  $A = A_1 - A_2$  (б), а якщо в однаковій фазі, амплітуда результуючих коливань збільшується:  $A = A_1 + A_2$  (в)



**Рис. 22.7.** Інтерференційна картина двох колових хвиль від точкових джерел. На поверхні води можна побачити ділянки, де коливання майже не відбуваються

## 5 Інтерференція хвиль

Для хвиль не дуже великих амплітуд виконується *принцип суперпозиції*: якщо в певну точку простору надходять хвилі від кількох джерел, то ці хвилі накладаються одна на одну. Унаслідок такого накладання в деяких точках простору весь час може спостерігатися посилення коливань, а в деяких — послаблення. З'ясуємо, чому і коли це відбувається. Нехай у деяку точку  $M$  надходять дві *когерентні хвилі* — хвилі від двох джерел  $S_1$  і  $S_2$ , що коливаються *синхронно*, тобто в *однаковій фазі та з однаковою частотою* (рис. 22.6, а).

Якщо хвилі надійшли у точку  $M$  у протилежних фазах (у той самий момент часу одна хвилля «штовхає» точку  $M$  угору, а друга «штовхає» її вниз), то хвилі весь час гаситимуть одна одну (рис. 22.6, б).

Якщо ж хвилі надійшли в точку  $M$  в однаковій фазі, то в точці  $M$  *весь час* будуть спостерігатися коливання зі збільшеною амплітудою (рис. 22.6, в).

Явище накладання хвиль, унаслідок якого в певних точках простору спостерігається стійке в часі посилення або послаблення результуючих коливань, називають **інтерференцією**.

Розгляніть [рис. 22.7](#) і згадайте, коли ви спостерігали подібне. Чи побачимо ми інтерференційну картину, якщо качки будуть коливатися з різною частотою?

## 6 Дифракція хвиль

Судно, що пливе морем, утворює на поверхні води хвилю. Якщо на своєму шляху хвиля зустріне скелю або гілку, що стирчить із води, то за скелею утвориться тінь (тобто безпосередньо за скелею хвиля не проникає), а за гілкою тінь не утвориться (хвиля просто її огинає).

Явище огинання хвильми перешкод називають **дифракцією** (від латин. *diffractus* — розламаний) (рис. 22.8).

У наведеному прикладі дифракція хвилі відбувається на гілці, але не відбувається на скелі. Але це не завжди так. Якщо скеля достатньо віддалена від берега, то на певній відстані від скелі тінь зникне — хвилі обігне ї скелю. Річ у тім, що дифракція спостерігається у двох випадках: 1) коли лінійні розміри перешкод, на які падає хвилі (або розміри отворів, через які хвилі поширюється), порівнянні з довжиною хвилі; 2) коли відстань від перешкоди до місця спостереження набагато більша за розмір перешкоди.



### Підбиваємо підсумки

- Поширення в просторі коливань речовини або поля називають хвилею. Механічною хвилею називають поширення коливань у пружному середовищі.
- Хвилі поширюються в просторі не миттєво, а з певною швидкістю. Під час поширення хвилі відбувається перенесення енергії без перенесення речовини. У певних точках простору внаслідок накладання хвиль одна на одну може спостерігатися стійке в часі посилення або послаблення результиуючих коливань — це явище називають інтерференцією. Хвилі можуть огинати перешкоди — це явище називають дифракцією.
- Хвилю, в якій частинки середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, називають поперечною. Хвилю, в якій частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, називають поздовжньою.
- Хвиля періодична в часі та просторі. Періодичність хвилі в часі характеризується періодом коливань кожної окремої точки хвилі. Періодичність хвилі в просторі характеризується довжиною хвилі. Довжина хвилі — це відстань, на яку поширюється хвилі за час, що дорівнює періоду коливань. Довжина  $\lambda$  хвилі та частота  $v$  хвилі пов'язані формулою хвилі  $v = \lambda v$ , де  $v$  — швидкість поширення хвилі.

### Контрольні запитання



- Дайте означення механічної хвилі, опишіть механізм її утворення.
- Назвіть основні особливості хвильового руху.
- Які фізичні величини характеризують хвилю?
- Що таке довжина хвилі? Від чого вона залежить?
- Як пов'язані довжина, частота та швидкість поширення хвилі?
- Що означає вираз «хвиля періодична в часі та просторі»?
- Які хвилі називають поздовжніми? поперечними? У яких середовищах вони поширюються?
- Які хвилі називають сферичними? плоскими? Як із віддаленням від джерела змінюється енергія хвилі?
- У чому полягає явище інтерференції? У яких випадках хвилі посилюють одна одну? послаблюють одна одну?
- Наведіть приклади дифракції механічних хвилі.

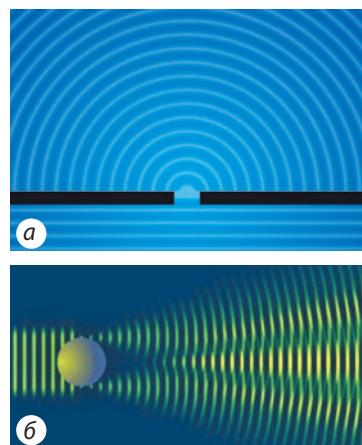


Рис. 22.8. Дифракція механічних хвиль на отворі (а); на перешкоді (б)

**Вправа № 22**

1. Тіло на поверхні води здійснює 90 коливань за 36 с. Від тіла зі швидкістю 1,5 м/с поширюється механічна хвіля. Установіть відповідність між фізичною величиною та її числовим значенням в одиницях СІ.

- |                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 1 Довжина хвилі                 | A 0,4 |
| 2 Частота хвилі                 | B 0,6 |
| 3 Період коливань джерела хвилі | C 2,4 |
|                                 | D 2,5 |

2. На рис. 1 показано поширення хвилі пружиною. Визначте довжину хвилі. Яка це хвіля — поздовжня чи поперечна?
3. Шнуром поширюється поперечна хвіля. У поданий на рис. 2 момент часу точка *B* рухається вгору. Визначте: 1) амплітуду, довжину, частоту хвилі; 2) напрямок поширення хвилі; 3) напрямок, у якому в даний момент часу рухаються точки *A* і *C* хвилі; 4) напрямок прискорення руху точок *A* і *C*.
4. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтесь, як утворюються та поширюються сейсмічні хвилі під час землетрусу. Якими можуть бути частота, довжина, швидкість поширення таких хвиль? Як передбачити землетрус? Складіть задачу за отриманими даними.
5. Звукові хвилі — це механічні хвилі. Згадайте курс фізики 9 класу та наведіть кілька прикладів джерел звукових хвиль.

**Експериментальне завдання**

Виготовте пристрой (див., наприклад, рис. 22.5, б), за допомогою яких можна створити колові та плоскі хвилі на поверхні води у ванні. Здійсніть відеозапис таких хвиль і визначте їх характеристики. Поспостерігайте інтерференцію хвиль від двох джерел (поміркуйте, як їх слід коливати), дифракцію хвиль на отворі та на перешкоді.

**Фізика і техніка в Україні**

**Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України** (Київ) створений у 1966 р.; його засновником і першим директором був академік Георгій Степанович Писаренко.

Основні напрями наукової діяльності інституту — механіка руйнування й живучість конструкцій, коливання неконсервативних механічних систем — принесли установі світове визнання (нагадаємо одну із задач будівельної механіки: якими мають бути завтовшки стіни різних будівель, щоб

витримати навантаження не тільки в нормальніх умовах, але й у разі землетрусів). Учені інституту здійснили вагомий внесок у розвиток теоретичних і експериментальних досліджень із встановлення критеріїв міцності та методів підвищення несної здатності матеріалів і елементів технічних конструкцій.

1 клітинка — 5 мм

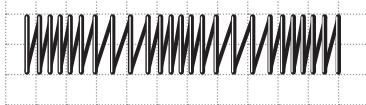


Рис. 1

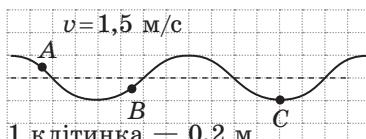


Рис. 2

## § 23. ЗВУКОВІ ХВИЛІ



Звучання флейти, гамір мегаполіса, шурхіт трави, гуркіт водоспаду, людські розмови, музичний звук, шум, акустичний резонанс... Усе це пов'язане з поширенням у просторі певних механічних хвиль, які називають звуковими хвилями. Їх вивчає **акустика** — наука про звук. Із елементами акустики ви почали знайомитися в курсі фізики 9 класу. Отже, згадуємо та дізнаємося нове.



### 1 Згадуємо звукові хвилі

**Звукові (акустичні) хвилі** — це механічні хвилі з частотами від 20 Гц до 20 кГц.

Звукові хвилі зазвичай доходять до вуха через повітря — у вигляді почергових згущень і розріджень (тобто в повітрі звукові хвилі є поздовжніми). У зонах згущень (розріджень) тиск повітря є **незначно більшим** (меншим) від атмосферного (рис. 23.1).

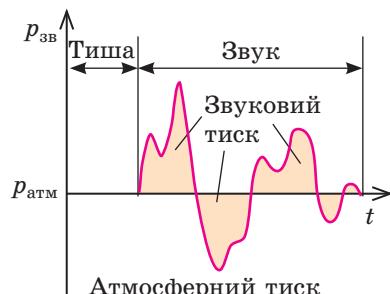
Оскільки звук є механічною хвилею, всі властивості хвильового руху стосуються й звуку.

- **Звук поширюється в середовищі зі скінченною швидкістю, яка 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 (так, у повітрі за температури 0 °C швидкість поширення звуку дорівнює приблизно 330 м/с, а за температури 20 °C — 340 м/с). До того ж чим менша маса молекул середовища, тим швидше поширюється звук.

- **Джерелом звуку є тіло, що коливається** (рис. 23.2). Такі коливання можуть бути **вимушеними** (дифузор гучномовця), **вільними** (струна гітари), **автоколиваннями** (струни смичкових інструментів).

- **Звукові хвилі не поширюються у вакуумі.**
- **Під час поширення звуку не відбувається перенесення речовини, але відбувається перенесення енергії.**

- **Звукові хвилі можуть накладатись одна на одну** (явище **інтерференції**); можуть **огинати перешкоди** (явище **дифракції**).



**Рис. 23.1.** Людське вухо сприймає звукові хвилі з надлишковим тиском приблизно від 20 мкПа (0 децибелів — поріг чутності) до 20 Па (120 децибелів — боловий поріг). Для порівняння:  $p_{\text{атм}} = 100\ 000 \text{ Па}$



**Рис. 23.2.** Якщо до ніжки камертона, який звучить, піднести легку кульку, то кулька відскочить, адже ніжки камертона коливаються

Які досліди та спостереження можуть підтвердити зазначені властивості звуку?

## 2 Як пов'язані суб'єктивні та об'єктивні характеристики звуку

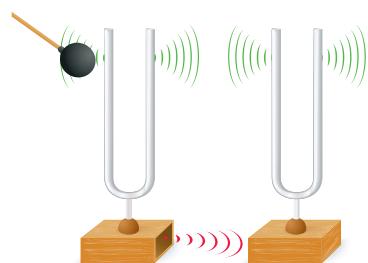
Усі фізичні величини, що характеризують механічні хвилі (амплітуда, частота, довжина, енергія), також є й характеристиками звуку. Ці величини не залежать від особливостей сприйняття звуку людиною, тому їх називають *об'єктивними*, або *фізичними*, характеристиками звуку. *Суб'єктивні характеристики звуку* (гучність, висота, тембр звуку) ґрунтуються на особливостях слуху людини, тому їх називають *фізіологічними*. Зрозуміло, що фізичні та фізіологічні характеристики звуку пов'язані (див. таблицю).

Суб'єктивні (фізіологічні) характеристики звуку	
<p><b>Гучність звуку</b></p> <p><b>Гучність звуку</b> визначається насамперед <i>амплітудою звукової хвилі</i> (а отже, й звуковим тиском), проте залежить і від частоти звукової хвилі. Людське вухо погано сприймає звуки низьких (блізько 20 Гц) і високих (блізько 20 кГц) частот, найкраще — середніх частот (1–3 кГц).</p> <p>Гучність звуку вимірюють у <i>децибелах</i> (дБ). Наприклад, за частоти звуку 1 кГц і звукового тиску 20 Па гучність звуку становить 120 дБ — це <i>боловий поріг звуку</i> — найгучніший звук, який може сприймати людина, не відчуваючи болю (звук такої гучності видає двигун реактивного літака).</p>	<p><b>Гучність звуку</b> звуку визначається насамперед <i>амплітудою звукової хвилі</i> (а отже, й звуковим тиском), проте залежить і від частоти звукової хвилі. Людське вухо погано сприймає звуки низьких (блізько 20 Гц) і високих (блізько 20 кГц) частот, найкраще — середніх частот (1–3 кГц).</p> <p>Гучність звуку вимірюють у <i>децибелах</i> (дБ). Наприклад, за частоти звуку 1 кГц і звукового тиску 20 Па гучність звуку становить 120 дБ — це <i>боловий поріг звуку</i> — найгучніший звук, який може сприймати людина, не відчуваючи болю (звук такої гучності видає двигун реактивного літака).</p>
<p><b>Висота звуку</b></p> <p><b>Висота звуку</b> визначається в основному <i>частотою звукової хвилі</i>: чим більша її частота, тим вищий тон звуку.</p> <p>Наприклад, ноті «ля» першої октави відповідає частота 440 Гц; ноті «ля» другої октави — частота 880 Гц.</p> <p>Властивість людського вуха розрізняти звуки за їх частотою також залежить від інтенсивності звуків. У разі збільшення інтенсивності звуку його висота здається більш низкою.</p>	<p><b>Висота звуку</b> визначається в основному <i>частотою звукової хвилі</i>: чим більша її частота, тим вищий тон звуку.</p> <p>Наприклад, ноті «ля» першої октави відповідає частота 440 Гц; ноті «ля» другої октави — частота 880 Гц.</p> <p>Властивість людського вуха розрізняти звуки за їх частотою також залежить від інтенсивності звуків. У разі збільшення інтенсивності звуку його висота здається більш низкою.</p>
<p><b>Тембр звуку</b></p> <p><b>Тембр звуку</b> визначається <i>складом звукової хвилі</i>: крім основної частоти (за якою ми й оцінюємо висоту звуку) будь-який звук містить кілька більш слабких і більш високих додаткових частот — <i>обертонів</i>. Саме завдяки тембрю ми впізнаємо людину за голосом, відрізняємо звуки фортепіано від звуків флейти тощо. Кожний музичний інструмент, кожна людина або тварина має власний тембр звуку.</p> <p>Фортепіано      Флейта      Голос людини</p>	<p><b>Тембр звуку</b> визначається <i>складом звукової хвилі</i>: крім основної частоти (за якою ми й оцінюємо висоту звуку) будь-який звук містить кілька більш слабких і більш високих додаткових частот — <i>обертонів</i>. Саме завдяки тембрю ми впізнаємо людину за голосом, відрізняємо звуки фортепіано від звуків флейти тощо. Кожний музичний інструмент, кожна людина або тварина має власний тембр звуку.</p> <p>Фортепіано      Флейта      Голос людини</p>

## 3

### Що таке акустичний резонанс

На будь-яке тіло, розташоване в межах поширення звукової хвилі, діє певна періодична сила, частота якої дорівнює частоті хвилі. Під дією цієї сили тіло починає здійснювати вимушенні коливання. Якщо частота власних коливань тіла збігається з частотою звукової хвилі, то амплітуда коливань тіла збільшується і воно починає випромінювати звук — спостерігається *акустичний резонанс*.



**Акустичний резонанс** — це явище різкого зростання амплітуди звукового сигналу в разі наближення частоти сигналу-збудника до частоти власних коливань системи.

Спостерігати акустичний резонанс можна за допомогою досліду з двома камертонами, що мають однакову частоту (рис. 23.3).

Акустичний резонанс використовують для збільшення інтенсивності звуку, створеного певним джерелом (струною, ніжками камертона, голосовими зв'язками тощо). Наприклад, для збільшення гучності камертона його приєднують до дерев'яного ящика (резонатора), власна частота коливань повітря в якому дорівнює частоті коливань камертону. Камертон, приєднаний до резонатора, звучить набагато гучніше, ніж той, який тримають у руці.

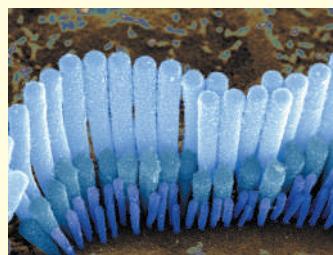
?

А в якому випадку камертон звучатиме довше — з резонатором чи без нього?

Акустичний резонанс використовують у багатьох музичних інструментах. Повітря в трубах органа, корпусах арф, бандур, гітар тощо резонує з тонами та обертонами звуків, утворюваних коливними тілами, та посилює їх. Порожнина рота є резонатором для звукових хвиль, які створюються завдяки коливанням голосових зв'язок.

#### Як ми чуємо

Звукова хвиля, досягши вуха, зазнає низки перетворень. Спочатку вона діє на *барабанну перетинку*, змушуючи її вібрувати. Чим гучніший звук, тим сильніше вібрує перетинка, передаючи звукові коливання в *середнє вухо*, де вони посилюються.



Посилений звук потрапляє у *внутрішнє вухо* із заповненою рідиною *завиткою*. Поверхня завитки вкрита *волосковими клітинами*, кількість яких сягає 15 тисяч. Кожна клітина резонує з певним діапазоном частот. Виявивши «власну» частоту, клітина починає коливатися, збуджуючи нервові закінчення, і в мозок іде нервовий імпульс — людина чує звук.

Із віком кількість волоскових клітин зменшується (від 15 тисяч у дитини до 4 тисяч у літньої людини). Першими гинуть клітини, які «відповідають» за високу частоту, тому доросла людина не чує високих звуків (підліток чує звуки до 22 кГц, літня людина — до 12 кГц).



**Рис. 23.4.** Медузи відчувають інфразвук від штурму, що наближається, за 15 годин до його початку, тому заздалегідь відпливають від берега

Інфразвук є дуже небезпечним для тварин і людини: він може викликати симптоми морської хвороби, запаморочення, засліплення, спричинити підвищено агресивність. У разі тривалої дії інтенсивне інфразвукове випромінювання може привести до зупинки серця. При цьому людина навіть не розуміє, що відбувається, адже вона не чує інфразвуку.

Механічні хвилі, частота яких перевищує 20 кГц, називають **ультразвуковими хвильами** (від латин. *ultra* — понад, за межами).

Ультразвук наявний у шумі вітру та водоспаду, у звуках, які видають деякі істоти. З'ясовано, що ультразвук до 100 кГц сприймають багато комах і гризунів; уловлюють його й собаки. Ультразвук застосовують у техніці, медицині.

Слабий ультразвук зазвичай використовують для **ультразвукової локації** — *визначення розташування та характеру руху об'єкта за допомогою ультразвуку*. Так, кажани та дельфіни, випромінюючи ультразвук і сприймаючи його відлуння, можуть навіть у повній темряві знайти дорогу або спіймати здобич. Ультразвукове дослідження дозволяє «побачити» ще не народжене немовля, дослідити стан внутрішніх органів, виявити сторонні тіла в тканинах. Ультразвукову локацію застосовують також на морських суднах — для виявлення об'єктів у воді (*сонари*) і дослідження рельєфу морського дна (*ехолоти*); у металургії — для виявлення та встановлення розмірів дефектів у виробах (*дефектоскопи*).

Потужний ультразвук застосовують у *техніці* (обробка міцних матеріалів, зварювання, очищення поверхонь від забруднень); *медицині* (подрібнення каменів в організмі, що дозволяє уникнути хірургічних операцій); *харчовій промисловості* (виготовлення сирів, соусів); *косметології* (виготовлення кремів, зубної пасті).



### Підбиваємо підсумки

- Механічні хвилі з частотами 20 Гц — 20 кГц називають звуковими хвильами (звуком). Суб'єктивні характеристики звуку: висота звуку (визначається частотою звукової хвилі); гучність звуку (визначається амплітудою та частотою звукової хвилі); тембр звуку (визначається спектром звукової хвилі).

### 4 Згадуємо інфра- й ультразвук

**Інфразвук** (від латин. *infra* — нижче, під) — механічні хвилі, частота яких менша від 20 Гц.

Інфразвукові хвилі виникають під час штормів, землетрусів, цунамі, вивержень вулканів, унаслідок ударів об берег морських хвиль. Деякі істоти здатні сприймати інфразвукові хвилі (рис. 23.4). Джерелом інфразвуку можуть бути і об'єкти, створені людиною: турбіни, двигуни внутрішнього згоряння тощо. У містах найбільший рівень інфразвуку біля автомагістралей.

Інфразвук є дуже небезпечним для тварин і людини: він може викликати симптоми морської хвороби, запаморочення, засліплення, спричинити підвищено агресивність. У разі тривалої дії інтенсивне інфразвукове випромінювання може привести до зупинки серця. При цьому людина навіть не розуміє, що відбувається, адже вона не чує інфразвуку.

Механічні хвилі, частота яких перевищує 20 кГц, називають **ультразвуковими хвильами** (від латин. *ultra* — понад, за межами).

Ультразвук наявний у шумі вітру та водоспаду, у звуках, які видають деякі істоти. З'ясовано, що ультразвук до 100 кГц сприймають багато комах і гризунів; уловлюють його й собаки. Ультразвук застосовують у техніці, медицині.

Слабий ультразвук зазвичай використовують для **ультразвукової локації** — *визначення розташування та характеру руху об'єкта за допомогою ультразвуку*. Так, кажани та дельфіни, випромінюючи ультразвук і сприймаючи його відлуння, можуть навіть у повній темряві знайти дорогу або спіймати здобич. Ультразвукове дослідження дозволяє «побачити» ще не народжене немовля, дослідити стан внутрішніх органів, виявити сторонні тіла в тканинах. Ультразвукову локацію застосовують також на морських суднах — для виявлення об'єктів у воді (*сонари*) і дослідження рельєфу морського дна (*ехолоти*); у металургії — для виявлення та встановлення розмірів дефектів у виробах (*дефектоскопи*).

Потужний ультразвук застосовують у *техніці* (обробка міцних матеріалів, зварювання, очищення поверхонь від забруднень); *медицині* (подрібнення каменів в організмі, що дозволяє уникнути хірургічних операцій); *харчовій промисловості* (виготовлення сирів, соусів); *косметології* (виготовлення кремів, зубної пасті).

- Явище різкого зростання амплітуди звукового сигналу в разі наближення частоти сигналу-збудника до частоти власних коливань системи називають акустичним резонансом. Акустичні резонатори мають майже всі музичні інструменти.
- Механічні хвилі, частота яких менша від 20 Гц, називають інфразвуковими хвилями (інфразвук). Механічні хвилі, частота яких перевищує 20 кГц, називають ультразвуковими хвилями (ультразвук).

### Контрольні запитання



1. Що таке звук?
2. Наведіть приклади джерел і приймачів звуку.
3. Від чого залежить швидкість поширення звуку?
4. Якою фізичною величиною визначається висота звуку?
5. Де використовують акустичний резонанс?
6. Що таке інфразвук?
7. Як він впливає на людину?
8. Що таке ультразвук?
9. Наведіть приклади застосування ультразвуку в природі, медицині, техніці.

### Вправа № 23



Вважайте, що швидкість поширення звуку в повітрі — 340 м/с, у воді — 1500 м/с, чавуні — 5000 м/с.

1. Частота основного музичного тону «ля» 440 Гц. Визначте довжину хвилі цього тону в повітрі; воді; чавуні.
2. Якою є глибина моря, якщо ультразвуковий сигнал, відбившись від морського дна, повернувся через 0,8 с після посилання?
3. У скільки разів і як зміниться довжина звукової хвилі під час її переходу з води в повітря?
4. Чому в лісі ми чуємо одне одного, адже на «шляху» звукової хвилі є деревя, а деревина добре поглинає звук?
5. Чому резонатор камертону являє собою звичайний ящик, а корпуси віолончелі, скрипки, рояля мають складну форму?
6. Як відомо, вночі звук уздовж поверхні землі поширюється на більші відстані, ніж удень. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, як це можна пояснити.

### Експериментальне завдання



«Світломузика вдома». Для проведення експерименту вам потрібні: міцний пластиковий або паперовий стаканчик, харчова плівка, ізоляційна стрічка або скотч, невеличка дзеркальна поверхня (відламок дзеркала або CD-диска розмірами приблизно 1 × 1 см), лак, лазерна указка, ножиці.

*Підготовка до експерименту.* Обріжте дно стаканчика, накрійте широку частину отриманого зрізаного конуса харчовою плівкою та зафіксуйте плівку ізоляційною стрічкою. Посередині плівки закріпіть лаком «дзеркальце».

*Експеримент.* Покладіть стаканчик відкритою частиною впритул до динаміка магнітофона, комп’ютера тощо. Увімкніть музику та спрямуйте промінь від лазерної указки на дзеркало. «Сонячний зайчик» від лазерного променя «танцюватиме» під музику.

Поясніть спостережуване явище.



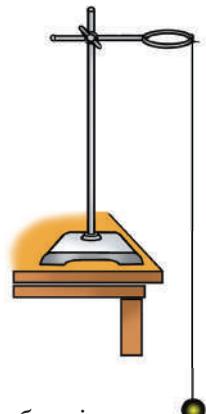


## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

**Тема.** Дослідження коливань нитяного маятника, вимірювання прискорення вільного падіння.

**Мета:** виготовити нитяний маятник, визначити за його допомогою прискорення вільного падіння; переконатися в справедливості формул Гюйгенса.

**Обладнання:** штатив із муфтою та лапкою, металева кулька (або тягарець) із петелькою, нитка завдовжки 1,5–2 м, вимірювальна стрічка, секундомір.



### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

#### ІІ Підготовка до експерименту

Виготовте маятник (див. [рисунок](#)). Нитка маятника має бути досить довгою — кулька повинна майже торкатися підлоги.

#### ІІІ Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Виміряйте довжину маятника (відстань від точки підвісу до центра кульки).
2. Відхиліть маятник від положення рівноваги на 5–8 см і відпустіть.
3. Виміряйте інтервал часу, за який маятник здійснює 20 коливань.
4. Повторіть дослід ще тричі, останнього разу (дослід 4) зменшивши довжину маятника вдвічі.

Номер досліду	Довжина нитки $l$ , м	Кількість коливань $N$	Час коливань		Період коливань $T$ , с
			$t$ , с	$t_{\text{cep}}$ , с	

#### ІV Опрацювання результатів експерименту

##### Частина 1. Вимірювання прискорення вільного падіння

1. За даними дослідів 1–3 визначте: 1) середній час 20 коливань:  $t_{\text{cep}} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3$ ; 2) період коливань маятника:  $T = t_{\text{cep}} / N$ ; 3) прискорення вільного падіння:  $g_{\text{вим}} = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ .
2. Оцініть відносну похибку експерименту, порівнявши значення прискорення вільного падіння, отриманого в ході експерименту ( $g_{\text{вим}}$ ), із табличним ( $g_{\text{табл}}$ ):  $\varepsilon_g = \left| 1 - \frac{g_{\text{вим}}}{g_{\text{табл}}} \right| \cdot 100 \%$ .

##### Частина 2. Перевірка формул Гюйгенса

1. Для досліду 4 обчисліть період коливань маятника у два способи: 1) скориставшись означенням періоду:  $T = \frac{t}{N}$ ; 2) скориставшись формuloю Гюйгенса:  $T' = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ; вважайте, що  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .
2. Оцініть відносну похибку експерименту:  $\varepsilon_T = \left| 1 - \frac{T}{T'} \right| \cdot 100 \%$ .

#### ІV Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. У висновку зазначте: 1) величини, які ви вимірювали; 2) чи залежать значення цих величин від довжини нитки (якщо залежать, то як); 3) причини похибки.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «МЕХАНІКА».

## Частина 3. Механічні коливання і хвилі

1. Ви поглибили свої знання про *механічні коливання*.

### Вільні коливання

відбуваються під дією тільки внутрішніх сил системи

існують у системах, де опір рухові є незначним або відсутнім, а рівнодійна повертає тіло в положення рівноваги

### МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ

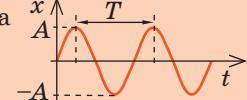
### Вимушені коливання

відбуваються під дією зовнішньої сили, яка періодично змінюється

Автоколивання відбуваються завдяки надходженню енергії від постійного джерела, що регулюється власне системою

2. Ви дізналися про ідеальний коливальний рух — *гармонічні коливання*.

**Гармонічні коливання** — коливання, під час яких координата матеріальної точки змінюється за законом синуса або косинуса:  $x = A \cos(\omega t + \phi_0)$  або  $x = A \sin(\omega t + \phi_0)$



Амплітуда  $A$ , м

$A = x_{\max}$   
максимальне зміщення

Період  $T$ , с

$T = \frac{t}{N}$  — час одного коливання

Частота  $\nu$ , Гц

$\nu = \frac{N}{t}$  — число коливань за 1 с

Циклічна частота  $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$

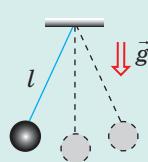
$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$  — число коливань за  $2\pi$  секунд

3. Ви ознайомилися з *вільними коливаннями математичного та пружинного маятників*.

#### Математичний маятник

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

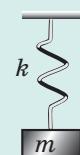
$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + mgh$$



#### Пружинний маятник

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



4. Ви дізналися про *явище резонансу*, яке виникає в коливальних системах.

**Резонанс** — явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, якщо частота зовнішньої періодичної сили збігається з власною частотою коливань системи.

5. Ви згадали *механічні хвилі* (процес поширення механічних коливань у пружному середовищі), види механічних хвиль, формулу хвилі.

**Поздовжні хвилі:** частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі



**Поперечні хвилі:** частинки середовища коливаються в напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення хвилі

Формула хвилі  
 $v = \lambda\nu$



6. Ви згадали *звукові хвилі* та їхні об'єктивні й суб'єктивні характеристики.

Інфразвук  
(1 мГц — 20 Гц)

ЗВУКОВІ ХВИЛІ

Ультразвук  
(понад 20 кГц)

**Чутний звук** (20 Гц — 20 кГц). *Висота (тон) звуку* визначається частотою звукової хвилі; *гучність звуку* — амплітудою коливань (значенням звукового тиску); *тембр звуку* — спектром звукової хвилі (кількістю та частотою обертонів).

# ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ І «Механіка». Частина 3. Механічні коливання і хвилі

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

- (1 бал) Які істоти можуть сприймати інфразвук?  
а) дельфіни; б) кажани; в) медузи; г) пінгвіни.
- (1 бал) Явище огинання хвилею перешкод називається:  
а) інтерференція; б) дифракція; в) резонанс; г) ехолокація.
- (2 бали) Установіть відповідність між означеннями та назвами фізичних величин, що характеризують хвилю.
 

1 Максимальне відхилення від положення рівноваги	А Довжина хвилі
2 Кількість коливань за одиницю часу	Б Частота коливань
3 Відстань між двома найближчими точками, що коливаються однаково	В Період коливань
4 Час одного коливання	Г Енергія коливань
5 (2 бали) Установіть відповідність між видом коливань і тілом, яке здійснює такі коливання.	Д Амплітуда коливань
1 Вільні коливання	А Биття серця
2 Вимушенні коливання	Б Коливання поплавця на поверхні води
3 Автоколивання	В Періодична зміна дня і ночі
	Г Коливання струни гітари
- (2 бали) Ніжка камертону випромінює ноту «ля» першої октави. Визначте довжину звукової хвилі, якщо швидкість поширення звуку дорівнює 330 м/с.  
а) 75 см; б) 37,5 см; в) 29 см; г) 14,5 см
- (3 бали) На рис. 1 подано поперечну хвилю, що біжить пружним шнуром. Як у даний момент напрямлені швидкість і прискорення руху точок A і B шнура?
- (3 бали) За графіком коливань тіла (рис. 2) запишіть рівняння коливань.
- (3 бали) Тіло, підвішене на пружині, відхилили на 5 см униз від положення рівноваги та відпустили. Який шлях пройде тіло за 10 с і яким буде його переміщення за цей час, якщо частота коливань — 0,625 Гц?
- (3 бали) Визначте період коливань маятника (рис. 3), якщо довжина нитки  $l=1,6$  м.



Рис. 1

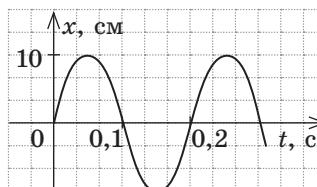


Рис. 2

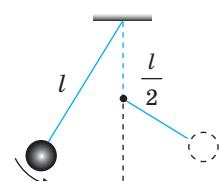


Рис. 3

- (4 бали) Рівняння коливань тягарця на пружині має вигляд:  $x=0,05 \cos 2\pi t$  (м). Визначте жорсткість пружини, максимальну швидкість коливань тягарця та потенціальну енергію пружини у фазі  $\pi/4$ , якщо маса тягарця — 200 г.

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, визначте суму балів і поділіть її на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



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

## Мрії фантастів утілюються в життя

У середині 2017 р. увесь світ жваво обговорював відео, на якому робот уперше в історії виконав сальто. Але як це яскраве видовище пов'язане з поняттями механіки?

По-перше, це красиво! Це технічно й естетично красиве рішення. За мільйони років природа втілила в живих організмах безліч ефектних «технічних рішень», які зараз відтворюють інженери. Так, принцип роботи екскаватора нагадує рух руки людини, планери ширяють у небі подібно до птахів. Виник навіть новий розділ техніки — *біоніка*, яка використовує ідеї природи для створення нових технічних рішень. Зрозуміло, що людиноподібні роботи — це, мабуть, «найпросунутіший» приклад.

А от «по-друге» стосується механіки безпосередньо. Людина — це досить слабка істота. Навіть треновані люди зазвичай не можуть бігти швидше за 40 км/год і піднімати більше за 250 кг. Із давніх-давен для збільшення своїх можливостей людина застосовувала або тварин (коні, слони, воли тощо), або прості пристлади (важіль, колесо та ін.), причому тисячі років переважало саме застосування тварин. Люди подорожували пішки, а щоб прискорити процес — сідали на коня або в карету. Орали також за допомогою тварин.

Ситуація почала змінюватися приблизно 150 років тому. Розвиток механіки дозволив замінити коней потягами й автомобілями. Зверніть увагу на дати: автомобіль уперше став рухатися швидше за гепарда (найшвидша тварина на землі, розвиває швидкість 110–115 км/год) тільки на межі XIX



і XX ст. — трохи більше ніж 100 років тому! Приблизно в той самий час (грудень 1903 р.) подібно до птахів піднявся в небо літак — механічний апарат, важчий за повітря. А найшвидшого птаха (сапсан здатний розвивати швидкість понад 322 км/год) літак «обігнав», досягнувши швидкості 350–400 км/год, тільки в середині 1920-х рр. (а це ж зовсім нещодавно — тоді, можливо, ваші прабабусі та прадідусі ходили до школи!). Звісно, зараз ситуація докорінно змінилася: нікого не дивує подорож пасажирським авіалайнером зі швидкістю понад 800 км/год, а для автомобілів із міркувань безпеки навіть запроваджено обмеження швидкості.

Незважаючи на безумовний прогрес механічних пристрій, вони здебільшого не можуть працювати без людини. Тож насправді в сучасних механізмах працюють, так би мовити, два складники механіки: створений інженерами власне пристрій і досвід людини, яка керує цим пристроєм та навички якої теж базуються на законах механіки.

Повернімося до сальто робота. Це один із перших прикладів об'єднання дійсно красивого технічного рішення (на знімках робот дуже схожий на людину в скафандрі) і креативного «мозку»: на основі рівнянь механіки інженери «навчили» механізм правильних рухів.

Чекаємо на майбутні досягнення...



# РОЗДІЛ ІІ. ЕЛЕМЕНТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

## § 24. ПОСТУЛАТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ. РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ



А. Ейнштейн

«Відтоді як за теорію відносності взялися математики, — зізнавався А. Ейнштейн, — я її вже й сам не розумію». І не дивно, що навколо теорії відносності ось уже 100 років не вщухають запеклі суперечки тих, хто її «не розуміє». А що послугувало причиною створення цього, на перший погляд, суто теоретичного розділу фізики? Виявляється, спочатку, майже як завжди у фізиці, був експеримент.

### 1 Принцип відносності Галілея — Ньютона

Механіка — наука про рух. У механіці І. Ньютона будь-який рух розглядають відносно інерціальних систем відліку (СВ). Розв'язуючи задачу, обирають певну *інерціальну СВ*, умовно вважаючи її нерухомою. Однак це не означає, що обрана СВ — єдино правильна. Можна обрати будь-яку інерціальну СВ — результат буде тим самим.

Для інерціальних СВ справджується **механічний принцип відносності** (принцип відносності Галілея — Ньютона):

Будь-які механічні процеси в усіх інерціальних СВ відбуваються однаково, тобто жодними механічними дослідами всередині системи не можна встановити, рухається система рівномірно прямолінійно чи перебуває в стані спокою.

В інерціальних СВ виконується **класичний закон додавання швидкостей**: *швидкість  $\vec{v}$  руху тіла відносно нерухомої СВ дорівнює сумі швидкості  $\vec{v}_1$  руху тіла відносно рухомої СВ і швидкості  $\vec{v}_2$  руху рухомої СВ відносно нерухомої*:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .

### 2 Якими були передумови створення спеціальної теорії відносності

Після того як у середині XIX ст. англійський фізик Джеймс Максвелл (1831–1879) сформулював основні закони електродинаміки, виникло запитання: чи поширюється принцип відносності Галілея — Ньютона на електромагнітні явища? Інакше: чи відбуваються електромагнітні процеси (взаємодія електричних зарядів, явище електромагнітної індукції, поширення електромагнітних хвиль тощо) однаково в усіх інерціальних СВ? Уже перші міркування над цим питанням давали, здраво, заперечну відповідь.

Наприклад, відповідно до законів електродинаміки *швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі*, в тому числі швидкість поширення світла, однакова в усіх напрямках і дорівнює 299 792 458 м/с (для розрахунків зазвичай беруть округлене значення:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Однак відповідно до класичного закону додавання швидкостей швидкість поширення світла має бути різною в різних СВ.

Чи так це, чи залежить швидкість поширення світла від вибору СВ? Для відповіді на це запитання американські вчені *Альберт Майкельсон* (1852–1931) і *Едвард Морлі* (1838–1923) у 1887 р. поставили експеримент.

Ідея вчених була такою. Якщо від джерела світла на Землі спрямувати промінь світла спочатку вздовж лінії руху Землі, а потім перпендикулярно до неї, то кожного разу швидкість поширення світла відносно нерухомої СВ має бути різною. Справді, згідно з класичним законом додавання швидкостей швидкість  $c_1$  світла, що поширяється в напрямку руху Землі, має дорівнювати:

$$c_1 = c + v,$$

де  $v = 2,96 \cdot 10^4$  м/с — швидкість руху Землі навколо Сонця.

Якщо світло поширяється в напрямку, протилежному напрямку руху Землі, то швидкість  $c_2$  його поширення має дорівнювати:  $c_2 = c - v$ . Відповідно швидкість  $c_3$  світла, яке поширяється перпендикулярно до напрямку руху Землі, має становити:  $c_3 = \sqrt{c^2 + v^2}$ .

Досліди А. Майкельсона й Е. Морлі показали, що *швидкість поширення світла в будь-якому випадку є однаковою* (рис. 24.1). Це загнalo в «глухий кут» провідних фізиків кінця XIX — початку ХХ ст., адже *одержаний результат суперечив класичному закону додавання швидкостей*.

Тож яка теорія правильна — класична механіка І. Ньютона чи електромагнітна теорія Дж. Максвелла? Розв'язанням проблеми зацікавилися провідні фізики того часу, серед яких *Гендрік Антон Лоренц* (1853–1928), *Жуль Анрі Пуанкарé* (1854–1912), *Герман Мінковський* (1864–1909), *Альберт Ейнштейн* (1879–1955). Було зрозуміло, що проблему можна розв'язати тільки на основі нових фізичних уявлень про простір і час. Такі уявлення почали розвиватися ще наприкінці XIX ст., а остаточно були сформульовані А. Ейнштейном у роботі «До електродинаміки рухомих тіл». Незалежно один від одного А. Ейнштейн і Ж. А. Пуанкарé сформулювали важливі постулати, які було покладено в основу *спеціальної теорії відносності*, або *релятивістської механіки* (від латин. *relativus* — відносний).

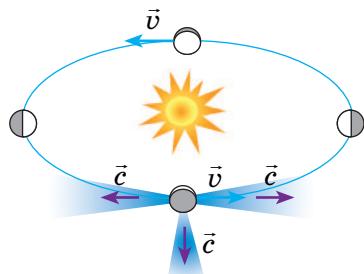
**Спеціальна теорія відносності (СТВ)** розглядає взаємозв'язок фізичних процесів *тільки в інерціальних СВ*, тобто в СВ, які рухаються одна відносно одної рівномірно прямолінійно.

### 3 Постулати спеціальної теорії відносності

#### Перший постулат СТВ:

В інерціальних СВ всі закони природи однакові.

Це означає, що *всі інерціальні СВ еквівалентні (рівноправні)*. У разі наявності двох інерціальних СВ немає сенсу з'ясовувати, яка з них рухається



**Рис. 24.1.** Незалежність швидкості поширення світла від вибору СВ. Швидкість поширення світла вздовж лінії руху Землі та перпендикулярно до лінії її руху є незмінною і дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с

відносно спостерігача, а яка перебуває в спокої. Жодні досліди в будь-якій галузі фізики (електрика й магнетизм, молекулярна фізика, ядерна фізика, механіка тощо) не дозволяють виділити абсолютну (переважну) інерціальну СВ.

### Другий постулат СТВ:

Швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ.

Це означає, що швидкість поширення світла у вакуумі *інваріантна* — вона не залежить від швидкості руху джерела або приймача світла.

Незмінність швидкості поширення світла — фундаментальна властивість природи. Відповідно до цього постулату *швидкість поширення світла — максимальна можлива швидкість поширення будь-якої взаємодії*. Матеріальні об'єкти не можуть мати швидкість більшу, ніж швидкість світла.

### 4 Чи є абсолютном час

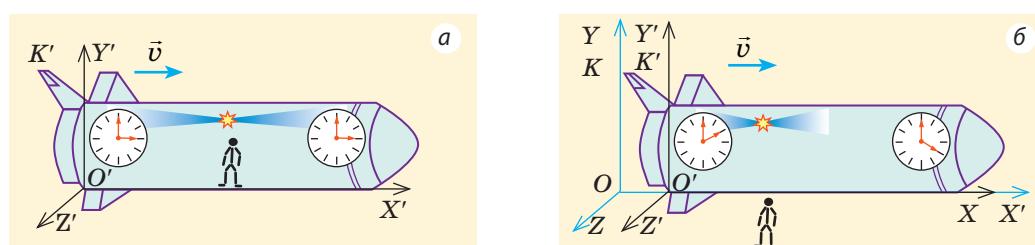
Після швидкості поширення світла другим найважливішим поняттям СТВ є поняття *події*.

**Подія** — будь-яке явище, що відбувається в певній точці простору в певний момент часу.

Подія для матеріальної точки вважається заданою, якщо задано координати  $(x, y, z)$  місця, де подія відбувається, і час  $t$ , коли ця подія відбувається. З геометричної точки зору, задати подію означає задати точку в чотиривимірному просторі «координати — час».

У класичній механіці І. Ньютона час однаковий у будь-якій інерціальній СВ, тобто такі поняття, як «зараз», «раніше», «пізніше», «одночасно», не залежать від вибору СВ. У релятивістській механіці час залежить від вибору СВ. Події, що відбулися в одній СВ одночасно, в іншій СВ можуть бути розділені часовим проміжком, тобто **одночасність двох подій відносна**. Покажемо це за допомогою уявного експерименту.

Нехай посередині космічного корабля (рис. 24.2), який рухається зі швидкістю  $v$  відносно зовнішнього спостерігача, відбувся спалах світла. Для спостерігача, який перебуває всередині корабля, світло досягає носа і корми корабля одночасно, тобто в системі відліку  $K'$ , пов'язаній із кораблем, ці дві події відбуваються одночасно (див. рис. 24.2, а). Для зовнішнього спостерігача світло досягає корми раніше, ніж носа корабля, тому що корма



**Рис. 24.2.** Відносність одночасності подій: а — для спостерігача всередині корабля світло досягає носа і корми корабля одночасно; б — для спостерігача поза кораблем світло досягає носа корабля пізніше, ніж корми

наближається до спостерігача, а ніс корабля віддаляється від нього, тобто в системі відліку  $K$ , пов'язаній із зовнішнім спостерігачем, ці дві події відбуваються не одночасно (див. рис. 24.2, б).

### 5 Релятивістський закон додавання швидкостей

Відповідно до другого постулату СТВ швидкість поширення світла у вакуумі є незмінною й не залежить від швидкості руху джерела або приймача світла. Це означає, що класичний закон додавання швидкостей у релятивістській механіці застосовувати не можна. У СТВ застосовують **релятивістський закон додавання швидкостей**. Запишемо цей закон для окремого випадку, — випадку додавання швидкостей, напрямлених уздовж однієї прямої, наприклад осі  $OX$  (рис. 24.3). Тоді **релятивістський закон додавання швидкостей** має вигляд:

$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}},$$

де  $v_x$  — проекція швидкості руху тіла відносно нерухомої СВ  $K$ ;  $v_{1x}$  — проекція швидкості руху тіла відносно рухомої СВ  $K'$ ;  $v_{2x}$  — проекція швидкості рухомої СВ  $K'$  відносно нерухомої СВ  $K$ .

Зіставимо релятивістський і класичний закони додавання швидкостей. Якщо швидкості набагато менші від швидкості світла ( $v_1 \ll c$ ,  $v_2 \ll c$ ), то  $1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2} \approx 1$  і релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного:  $v_x = v_{1x} + v_{2x}$ .

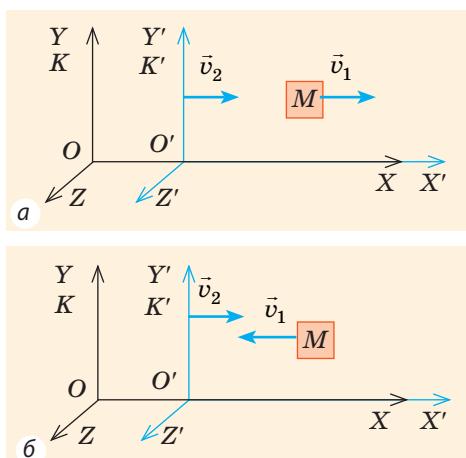


Чи можна, розглядаючи, наприклад, рух автомобіля відносно потяга, користуватися релятивістським законом додавання швидкостей? А чи варто?

### 6 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Доведіть, використовуючи релятивістський закон додавання швидкостей, що у випадку переходу від однієї інерціальної СВ до іншої швидкість поширення світла не змінюється.

**Аналіз фізичної проблеми.** Для розв'язання задачі слід виконати пояснювальний рисунок (ми скористаємося рис. 24.3). Нехай квант світла  $M$  рухається зі швидкістю  $\vec{v}_1$  ( $v_1 = c$ ) уздовж осі  $O'X'$  системи відліку  $K'$ , яка, у свою чергу, рухається зі швидкістю  $\vec{v}_2$  в напрямку осі  $OX$  системи відліку  $K$ . Нам потрібно визначити швидкість руху кванта відносно СВ  $K$ .



**Рис. 24.3.** Тіло  $M$  рухається зі швидкістю  $\vec{v}_1$  відносно СВ  $K'$ , яка, у свою чергу, рухається зі швидкістю  $\vec{v}_2$  відносно СВ  $K$ : а — напрямок руху тіла збігається з напрямком осі  $O'X'$ ; б — напрямок руху тіла протилежний напрямку осі  $O'X'$

**Розв'язання.** Розглянемо два випадки.

**Випадок 1:** квант світла рухається в напрямку осі  $O'X'$  (рис. 24.3, а).

**Випадок 2:** квант світла рухається протилежно напрямку осі  $O'X'$  (рис. 24.3, б).

Запишемо релятивістський закон додавання швидкостей:  $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$  (\*).

Знайдемо проекції швидкостей на вісь  $OX$ :

$$v_{1x} = v_1 = c, \quad v_{2x} = v_2.$$

$$v_{1x} = -v_1 = -c, \quad v_{2x} = v_2.$$

Підставивши одержані вирази у формулу (\*), маємо:

$$v_x = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c + v_2}{\frac{c + v_2}{c}} = c.$$

$$v_x = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{v_2}{c}} = \frac{v_2 - c}{\frac{c - v_2}{c}} = -c.$$

Отже, в будь-якому випадку швидкість руху кванта світла відносно СВ  $K$  дорівнює  $c$ ; знак « $-$ » означає, що квант рухається в напрямку, протилежному напрямку осі  $OX$ .

**Відповідь:** швидкість поширення світла не залежить від вибору СВ.



### Підбиваємо підсумки

• В основу спеціальної теорії відносності (СТВ) покладено два постулати: 1) в усіх інерціальних СВ закони природи однакові; 2) швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ; це максимально можлива швидкість руху й поширення взаємодії у Всесвіті.

• Одночасність двох подій відносна: події, одночасні в одній інерціальній СВ, не є одночасними в інерціальних СВ, що рухаються відносно першої СВ.

• У СТВ для визначення відносної швидкості руху тіл застосовують релятивістський закон додавання швидкостей:  $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$ . Він набуває вигляду класичного, коли швидкості набагато менші від швидкості світла. У загальному випадку класична механіка І. Ньютона є окремим випадком СТВ.



### Контрольні запитання

1. У чому результати експерименту А. Майкельсона й Е. Морлі суперечили класичному закону додавання швидкостей? 2. Сформулюйте постулати СТВ і поясніть їх зміст. 3. У чому полягає відмінність першого постулату СТВ від принципу відносності в механіці І. Ньютона? 4. Чому дорівнює швидкість поширення світла у вакуумі? 5. Що таке подія? Коли подія визначена? 6. Що означає вираз «одночасність двох подій відносна»? 7. За яких швидкостей релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного?



### Вправа № 24

- Два автомобілі рухаються назустріч один одному. Чому дорівнює швидкість поширення світла, випромінюваного фарами першого автомобіля, у СВ, пов'язаній із другим автомобілем?
- Йонізований атом, вилетівши з прискорювача зі швидкістю  $0,5c$  ( $c$  — швидкість поширення світла), випустив фотон у напрямку свого руху. Якою є швидкість руху фотона відносно прискорювача?

3. Космічна ракета віддаляється від спостерігача зі швидкістю  $0,8c$ . Яку швидкість відносно Землі матиме снаряд, випущений із ракети в напрямку її руху зі швидкістю  $0,6c$ ? Якою є швидкість руху снаряда відносно Землі, якщо він випущений у напрямку, протилежному напрямку руху ракети?
4. Дві ракети віддаляються одна від одної, рухаючись зі швидкостями  $0,7c$  відносно нерухомого спостерігача. Визначте: а) швидкість руху ракет відносно одна одної; б) на скільки збільшується щосекунди відстань між ракетами з точки зору спостерігача.
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, чому існують чорні діри.

## § 25. НАСЛІДКИ ПОСТУЛАТІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

«Вік існування речей лишається тим самим незалежно від того, чи швидкі їх рухи, чи повільні, а чи їх немає взагалі», — писав І. Ньютон. Творці класичної механіки вважали цілком очевидним, що і час, і розміри тіла абсолютно й не залежать від швидкості його руху. З'ясуємо, чи так це очевидно з погляду релятивістської механіки.

### 1 Чи змінюються лінійні розміри предметів під час їхнього руху

Довжиною стрижня називають відстань між його кінцями, координати яких зафіксовані одночасно (за годинником тієї системи, в якій вимірюється довжина). Оскільки одночасність двох подій відносна, то й довжина стрижня буде різною в різних СВ.

Нехай стрижень перебуває у спокої в СВ  $K'$ , яка рухається з деякою швидкістю  $v$  відносно СВ  $K$ . Якщо стрижень розташовано вздовж лінії руху системи  $K'$ , то згідно з теорією відносності має місце *лоренцеве скорочення довжини* (рис. 25.1):

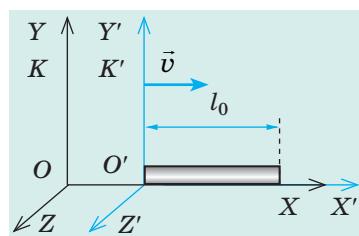
$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

де  $l_0$  — довжина стрижня в СВ  $K'$ , відносно якої стрижень перебуває у спокої;  $l$  — довжина стрижня в СВ  $K$ , відносно якої стрижень рухається.

*Зверніть увагу!*

1. *Розміри тіла зменшуються тільки вздовж його руху:* якщо стрижень розташований вздовж свого руху, то його довжина зменшується, а от діаметр залишається незмінним.

2. *Релятивістський ефект скорочення довжини стає помітним тільки у випадку руху тіла зі швидкістю, яка порівнянна зі швидкістю поширення світла:* навіть якщо ракета рухається з другою космічною швидкістю ( $v = 11,2$  км/с — найменша швидкість, яку слід надати ракеті, щоб



**Рис. 25.1.** Довжина  $l$  стрижня в СВ  $K$ , відносно якої стрижень рухається, є меншою від «власної» довжини  $l_0$  стрижня — довжини стрижня в СВ  $K'$ , відносно якої стрижень перебуває у спокої

вона подолала притягання Землі та стала супутником Сонця), то її довжина майже не змінюється; а от для частинки, розігнаної в прискорювачі до швидкості  $v=0,99c$ , ефект скорочення довжини стає дуже помітним.

?

Доведіть останнє твердження самостійно, здійснивши необхідні розрахунки.

## 2 У чому полягає ефект уповільнення часу

Розглянемо, як змінюється інтервал часу між двома послідовними по-діями у випадку переходу від однієї інерціальnoї СВ до іншої. Для цього скористаємося *світловим годинником* — стрижнем завдовжки  $L_0$ , на кінцях якого (перпендикулярно до стрижня) закріплено два дзеркала (див. рис. 25.2, а). Світловий імпульс рухається від одного дзеркала до іншого, і кожне відбиття імпульсу від дзеркала фіксується. Спостерігач, відносно якого годинник перебуває у спокої, помітить, що час між двома послідов-ними відбиттями дорівнює:  $\tau_0 = \frac{L_0}{c}$ .

Для спостерігача, відносно якого годинник рухається з деякою швид-кістю  $v$ , світловий імпульс пройде відстань  $L > L_0$  (рис. 25.2, б), тому цей спо-стерігач зафіксує інший час між двома послідовними відбиттями:  $\tau = \frac{L}{c}$ .

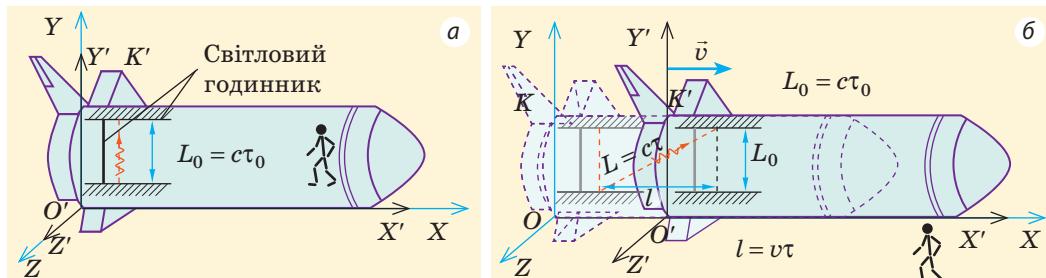
За теоремою Піфагора:  $L^2 = l^2 + L_0^2$ , або:

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct_0)^2 \Rightarrow \tau^2(c^2 - v^2) = c^2 t_0^2 \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Звідси час  $\tau$ , вимірюваний спостерігачем, відносно якого годинник ру-хається, дорівнює:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Інтервал часу  $\tau_0$ , відлічуваний у СВ, відносно якої годинник перебуває у стані спокою (власний час події), менший, ніж інтервал часу  $\tau$ , відлічува-ний у СВ, відносно якої годинник рухається. Інакше кажучи, час у рухомій СВ уповільнюється.



**Рис. 25.2.** Вимірювання часу світловим годинником: а — вимірювання власного часу  $\tau_0$  події спостерігачем, який рухається разом із годинником; б — вимірювання часу  $\tau$  спостерігачем, відносно якого рухається годинник, — для цього спостерігача світло проходить більшу відстань, а отже, і за більший інтервал часу:  $L > L_0 \Rightarrow \tau > \tau_0$

**Зверніть увагу!** Уповільнення часу покаже будь-який годинник у рухомій СВ. **Ефект уповільнення часу — властивість самого часу.** У рухомій СВ уповільнюються всі фізичні процеси, уповільнюється й процес старіння.

Уповільнення часу експериментально спостерігається, наприклад, у ході радіоактивного розпаду ядер. Нехай у СВ, відносно якої ядро перебуває у спокої, період його піврозпаду дорівнює  $\tau_0 = 0,1$  с. Якщо за допомогою прискорювача розігнати ядро до таких швидкостей, що  $1 - \frac{v^2}{c^2} = 0,01$  (тобто  $v^2 = 0,99 c^2$ ), то період піврозпаду ядра становитиме:  $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,1 \text{ с}}{0,1} = 1 \text{ с.}$

Отже, з точки зору нерухомого спостерігача радіоактивний розпад прискорених ядер є уповільненим порівняно з радіоактивним розпадом таких самих ядер у стані спокою.

### 3 Як пов'язані маса та енергія

Ще один дуже важливий результат СТВ — залежність енергії  $E$  тіла від швидкості його руху. З точки зору СТВ, якщо тіло масою  $m$  рухається зі швидкістю  $v$  відносно якої СВ, то енергія  $E$  тіла в цій СВ становить:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (*)$$

Ця формула пройшла перевірку в експериментах із прискорення ядер, протонів, електронів. Із неї випливає кілька важливих **наслідків**.

1. **Будь-яке тіло (будь-яка частинка), що має масу, несе із собою запас енергії.** Дійсно, навіть якщо швидкість руху тіла (частинки) зменшується до нуля ( $v=0$ ), то згідно з формулою (\*) тіло все одно має енергію:

$$E = mc^2$$

Цю енергію називають **енергією спокою**.

### «Парадокс близнюків»

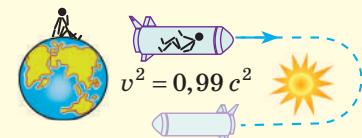
Для уточнення уповільнення темпів процесів у системах, які рухаються з великими швидкостями, А. Ейнштейн запропонував яскравий уявний експеримент.

Посадимо одного з близнюків у ракету й розжемо її до швидкості  $v^2 = 0,99 c^2$ . Повернемо його на Землю через один рік за годинником, який працює в ракеті:  $\tau_0 = 1$  рік. Годинник на Землі покаже, що між двома подіями — відльотом і прибуттям ракети — минуло:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1 \text{ рік}}{0,1} = 10 \text{ років.}$$

Отже, близнюк, який залишився на Землі, постаріє більше, ніж близнюк, який рухається зі швидкістю, близькою до швидкості світла.

Зробимо важливе зауваження: СТВ розглядає тільки інерціальні СВ. СВ, пов'язана з ракетою, яка відлітає із Землі й потім на неї повертається, не є інерціальною: ракета щонайменше тричі прискорюється — під час відльоту, під час розвороту й під час посадки. Із цієї причини безпосередньо застосовувати формулу уповільнення часу для ситуації з близнюками не можна. Її необхідно розглядати методами загальної теорії відносності (ЗТВ). Зазначимо, що в ЗТВ «парадокс близнюків» зберігається.





Переконайтесь, що енергія спокою величезна: обчисліть, яка енергія «схована» в 1 г води, та порівняйте її з кінетичною енергією вантажівки масою 5 т, яка мчить зі швидкістю 30 м/с.

2. *Зміна енергії тіла прямо пропорційна зміні його маси:  $\Delta E = \Delta m c^2$ .*

Передача нерухомому тілу енергії завжди супроводжується збільшенням його маси, і навпаки: виділення тілом енергії супроводжується зменшенням його маси. Наприклад, якщо тіло нагрівають, його маса збільшується, а коли охолоджують, його маса зменшується.

Повною мірою формулу зв'язку енергії і маси оцінили в 1940-х рр., коли створювали атомну бомбу. Річ у тім, що ядра Урану-235 діляться в процесі зіткнень із повільними нейtronами, унаслідок чого виділяється величезна кількість енергії. Розрахунки показали, що маса ядра Урану до його розпаду більша, ніж загальна маса частинок, які утворюються після розпаду. Оцей *дефект мас* ( $\Delta m$ ) і виділяється у вигляді енергії.

3. У випадках, коли тіло (частинка) рухається зі швидкістю, яка набагато менша, ніж швидкість світла ( $v \ll c$ ), формулу (\*) можна записати так:

$$E(v) = mc^2 + \frac{mv^2}{2},$$

де  $mc^2$  — енергія спокою;  $\frac{mv^2}{2}$  — кінетична енергія (додаткова енергія, яка виникає внаслідок руху тіла (частинки)).



### Підбиваємо підсумки

- Довжина тіла в різних СВ різна. Найбільшу довжину тіло має в тій СВ, де воно перебуває в спокої.
- Час у різних СВ плине з різною швидкістю. У рухомих СВ час плине повільніше, ніж у нерухомих.
- Енергія тіла (частинки), що рухається, залежить від швидкості його руху:  $E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Якщо швидкість  $v$  руху тіла (частинки) дорівнює нулю, то  $E = mc^2$  — енергія спокою тіла (частинки).

### Контрольні запитання



1. Як змінюється довжина предмета, якщо він рухається з незмінною швидкістю?
2. Який час називають власним часом події?
3. Як змінюється інтервал часу для тіла, яке рухається з незмінною швидкістю?
4. Який експеримент підтверджує ефект уповільнення часу?
5. Наведіть формулу залежності енергії тіла від швидкості його руху. Якого вигляду набуває ця формула у випадку малих швидкостей руху ( $v \ll c$ )?
6. Який зміст має величина  $mc^2$ ?



### Вправа № 25

1. У ракеті, що рухається відносно Землі зі швидкістю  $0,8c$ , минуло 2 роки. Скільки часу пройшло за обчисленнями спостерігача на Землі?

- Довжина стрижня відносно нерухомого спостерігача на Землі — 2 м. Якою є власна довжина цього стрижня, якщо він рухається зі швидкістю 0,6с?
- У скільки разів уповільнюється час у ракеті, яка рухається відносно Землі зі швидкістю  $2,6 \cdot 10^8$  м/с?
- Сонце щосекунди випромінює в космічний простір  $3,83 \cdot 10^{26}$  Дж енергії. На скільки маса Сонця зменшується за рік?
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, в яких галузях техніки слід обов'язково враховувати ефект уповільнення часу.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ II «ЕЛЕМЕНТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ»

- Ви ознайомилися з основними ідеями релятивістської механіки; з постулатами спеціальної теорії відносності (СТВ).

### Постулати СТВ

I. В інерціальних СВ усі закони природи однакові

II. Швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ

- Ви усвідомили, що швидкість поширення світла у вакуумі є максимальною швидкістю передачі будь-якої взаємодії:

$$c = 299\ 792\ 458 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

- Ви дізналися про відносність одночасності подій.

Одночасність двох подій, які відбуваються в різних точках простору, є відносністю: події, одночасні в одній інерціальній СВ, не є одночасними в інших інерціальних СВ, що рухаються відносно першої СВ з деякою швидкістю

- Ви ознайомились із законами релятивістської механіки та довідалися про наслідки постулатів СТВ.

Закон взаємозв'язку маси та енергії

$$E_0 = mc^2;$$

$$E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Закон додавання швидкостей у випадку одновимірної СВ

$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$$

Наслідки постулатів СТВ

Лоренцеве скорочення довжини

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Ефект уповільнення часу

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# РОЗДІЛ III. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

## ЧАСТИНА 1. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

### § 26. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

«Якби <...> всі накопичені наукові знання було б знищено і до прийдешніх поколінь перейшла б тільки одна фраза, то яке твердження принесло б найбільшу інформацію? Я вважаю, що це атомна гіпотеза: усі тіла складаються з атомів, маленьких тілець, які перебувають у безперервному русі, притягуються на невеликих відстанях, але відштовхуються, якщо одне з них щільніше притиснути до іншого». Ці слова належать Річардові Фейнману, лауреатові Нобелівської премії з фізики 1965 р., і вони практично дослівно повторюють ідеї грецького філософа Демокрита, висловлені понад 25 століть тому.

#### 1 Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

**Молекулярно-кінетична теорія (МКТ)** — теорія, що розглядає будову речовини з точки зору трьох основних положень.

1. *Усі речовини складаються з частинок* — атомів, молекул, іонів, тобто мають дискретну будову; між частинками є проміжки (рис. 26.1).
2. *Частинки речовини перебувають у невпинному безладному (хаотичному) русі*; такий рух називають *тепловим*.
3. *Частинки взаємодіють одна з одною* (притягуються і відштовхуються). Згадаємо означення основних структурних одиниць речовини.

**Атом** — найменша частинка, яка є носієм властивостей хімічного елемента.

Кожному хімічному елементу відповідає певний атом, який позначають символом елемента (атом Гідрогену H, атом Карбону C, атом Урану U).

Атом має складну структуру та являє собою ядро, оточене хмарою електронів. Кількість електронів в атомі дорівнює кількості протонів у його ядрі. Заряд електрона за модулем дорівнює заряду протона, тому атом є електрично нейтральним. Об'єднуючись, атоми утворюють молекули.

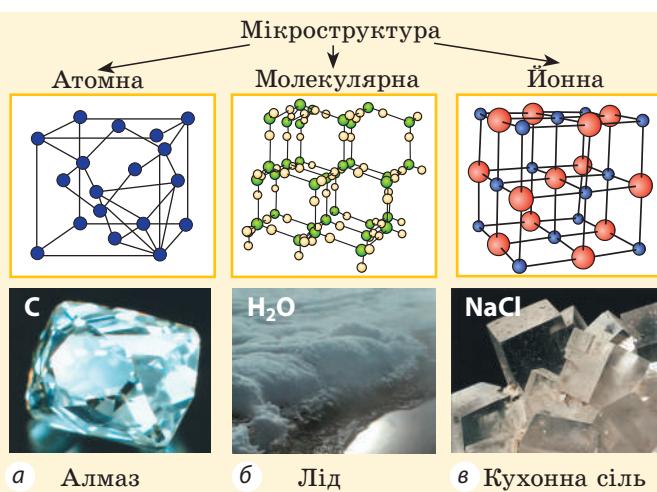


Рис. 26.1. Мікроструктура деяких речовин у кристалічному стані

**Молекула** — найменша частинка речовини, яка має хімічні властивості цієї речовини та складається з атомів.

Молекули різних речовин мають різний атомний склад. Усе величезне розмаїття речовин зумовлене різними сполученнями атомів у молекулах.

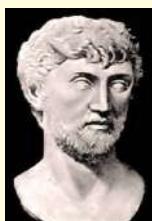
Якщо атом або молекула втратили один або кілька електронів, вони стають **позитивним іоном**; якщо ж до атома (молекули) приєдналися один або кілька електронів, утворюється **негативний іон**.

## 2 Які факти доводять існування атомів і молекул

Ми не можемо побачити частинки речовини через їх мікроскопічний розмір, проте ще філософи давнини наводили чимало непрямих доказів їх існування.

?

Прочитайте рядки з поеми римського поета і філософа *Тита Лукреція Кара* (бл. 99–55 рр. до н. е.), у якій він подав погляди філософів-атомістів давнини. Які докази існування атомів і молекул наводить Лукрецій?

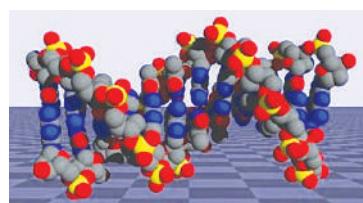


Одяг, розвішаний на узбережжі, де піниться хвиля, —  
Вогкий, а вистав на сонце його — за хвилину просохне,  
Та не догледіти, як осідає на ньому волога,  
Як утікає, заледве ковзнути по ній промені сонця.  
Отже, вода на такі вже дрібні розпадається крихти,  
Що й найзіркіше ніяк їх не зможе помітити око.  
Так от і перстень, коли його носиш на пальці постійно,  
З року на рік непомітно втрачає щось, робиться тоншим.  
Камінь уперта продовбує крапля. Леміш, хоч залізний,  
Теж поступово маліє — стирається, краючи землю.

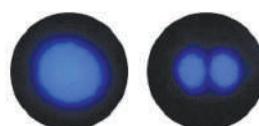
(Цит. за: *Лукрецій. Про природу речей* / Пер. А. Содомори. — К.: Дніпро, 1988)

Із часом з'явилися непрямі докази існування частинок речовини, і ці докази базувалися на чітких кількісних розрахунках. Так, наприкінці XVIII ст. було встановлено закон кратних відношень: якщо два елементи, що реагують між собою, утворюють кілька сполук, то різні маси одного елемента, що сполучаються з незмінною масою другого елемента, відносяться одна до одної як невеликі цілі числа. Наприклад, азот і кисень дали три сполуки:  $N_2O$ ,  $N_2O_2$ ,  $N_2O_5$ . Під час їх утворення з незмінною масою азоту маси кисню, що вступив у реакцію, відносяться як 1:2:5 відповідно. Це легко пояснити, зіставивши склад молекул утворених речовин.

Нині фізики створили низку пристрій (іонні проектори, електронні та тунельні мікроскопи), які дозволяють досліджувати не тільки склад молекул (рис. 26.2), але й внутрішню будову атома (рис. 26.3).



**Рис. 26.2.** Структура молекули ДНК, розрахована за даними, що отримані за допомогою тунельного електронного мікроскопа



**Рис. 26.3.** Зображення електронних хмар атома Карбону; вперше отримані в 2009 р. у Харківському фізико-технічному інституті

### Розміри молекул

Розміри молекул настільки малі, що це важко уявити. Якщо молекулу води ( $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м) збільшити в мільйон разів, то вона матиме розмір крапки ( $\approx 0,3$  мм). Унаслідок такого самого збільшення товщина волосини (0,1 мм) виявиться 100 м, діаметр вишні (1 см) — 10 км, а середній зріст людини (170 см) — 1700 км.

Щоб продемонструвати величезну кількість молекул, англійський фізик *Вільям Томсон* (lord Кельвін) запропонував уявний експеримент: «Припустимо, ми взяли склянку «міченіх» молекул води, вилили цю воду у Світовий океан і ретельно перемішали його. Потім зачерпнули склянку води з океану на іншому краї Землі та порахували в ній усі «мічені» молекули. У склянці їх виявиться близько тисячі!»



?

Спробуйте перевірити розрахунки В. Томсона. Об'єм Світового океану —  $1,34 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>.

### 3

### Наскільки малою є молекула

Досить точно встановлено: *розміри більшості молекул і діаметри всіх атомів становлять порядку  $10^{-10}$  м*. Зрозуміло, що й маси атомів і молекул теж малі (порядку  $10^{-26}$  кг). Вимірювати їх у таких одиницях, як кілограм, дуже незручно, тому було впроваджено **позасистемну одиницю — атомну одиницю маси**, яка дорівнює  $1/12$  маси атома Карбону  $^{12}\text{C}$ :

$$1\text{ а.о.м.} = \frac{1}{12} m_0 \left( ^{12}\text{C} \right) \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Масу молекули (атома), подану в атомних одиницях маси, називають **відносною молекулярною (відносною атомною) масою**  $M_r$ :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_0 \left( ^{12}\text{C} \right)}$$

Відносна молекулярна маса показує, у скільки разів маса  $m_0$  молекули більша, ніж  $1/12$  маси атома Карбону  $^{12}\text{C}$ .

### 4

### У яких одиницях рахують молекули

Макроскопічні тіла складаються з величезного числа частинок. Визначимо, наприклад, кількість молекул у склянці води ( $m=0,2$  кг). Маса молекули води  $m_0 \approx 3,0 \cdot 10^{-26}$  кг. Отже, у склянці води міститься:  $N = \frac{m}{m_0} \approx 7 \cdot 10^{24}$  молекул. Рахують таку величезну кількість мікрочастинок певними «порціями» — молями. *В одному молі будь-якої речовини міститься однакова кількість атомів або молекул*, — стільки, скільки атомів Карбону міститься у вуглеці масою 12 г. Це число має назву **стала Авогадро**:

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

Фізична величина, яка дорівнює кількості молів частинок речовини, називається

кількістю речовини  $v$ :  $v = \frac{N}{N_A}$ ,

де  $N$  — число частинок речовини.

Одиниця кількості речовини в СІ — **моль**:

$$[v] = 1 \text{ моль (mol)}.$$

Маса даної речовини, узятої в кількості 1 моль ( $6,02 \cdot 10^{23}$  молекул), називається **молярною масою  $M$  речовини**:

$$M = m_0 \cdot N_A ,$$

де  $m_0$  — маса молекули (атома) даної речовини.

Одиниця молярної маси в СІ — **кілограм на моль**:

$$[M] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right).$$



Отримайте формули, подані справа, самостійно.

5

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Скільки вільних електронів міститься в алюмінієвому бруску розмірами  $1 \times 4 \times 5$  см? Вважайте, що кожний атом Алюмінію дає один вільний електрон.

**Аналіз фізичної проблеми.** За умовою задачі кількість електронів дорівнює числу атомів Алюмінію у бруску об'ємом  $20 \text{ см}^3$  ( $1 \times 4 \times 5 \text{ см}$ ). Молярну масу алюмінію знайдемо, скориставшись Періодичною системою хімічних елементів:  $M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль} = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}$ . Густину алюмінію знайдемо в таблиці густин.

Дано:

$$V = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$N = ?$

Розв'язання

$$N = \frac{m}{M} N_A , \text{ де } m = \rho V — \text{ маса Алюмінію.}$$

$$\text{Остаточно маємо: } N = \frac{\rho V}{M} N_A = \frac{\rho V N_A}{M} .$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг}} = 1 ;$$

$$N = \frac{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3}} = 12 \cdot 10^{23} .$$

Відповідь:  $N = 12 \cdot 10^{23}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Усі речовини складаються з частинок: атомів, молекул, іонів. Частинки розділені проміжками і є дуже малими: їхні розміри становлять порядку  $10^{-10} \text{ м}$ , а маса — порядку  $10^{-26} \text{ кг}$ . Масу мікрочастинок прийнято вимірювати в атомних одиницях маси: 1 а. о. м.  $\approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .
- Число частинок речовини величезне, тому їх рахують у молях. В одному молі будь-якої речовини міститься однакове число частинок — стільки, скільки атомів Карбону міститься у вуглецю масою 12 г. Це число позначають символом  $N_A$  і називають числом Авогадро (сталою Авогадро):  $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

- Молярна маса дорівнює відносній молекулярній масі, поданій у грамах:

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

- Кількість речовини масою  $m$  і молярною масою  $M$  можна визначити за формулою:

$$v = \frac{m}{M}$$

- Число  $N$  молекул речовини дорівнює:

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

- Фізична величина, яка дорівнює кількості молів частинок речовини, називається кількістю речовини:  $v = \frac{N}{N_A}$ . Маса речовини, взятої в кількості 1 моль, називається молярною масою речовини:  $M = m_0 \cdot N_A$ .



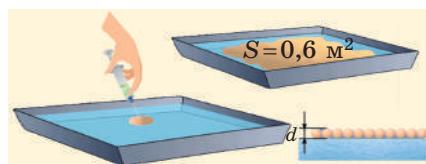
### Контрольні запитання

- Назвіть основні положення МКТ.
- Із яких частинок складається молекула?
- Яку будову має атом?
- Перелічіть відомі вам прямі та непрямі докази існування атомів і молекул.
- У яких одиницях прийнято вимірювати масу молекул? кількість молекул?
- Яким є фізичний зміст сталої Авогадро?
- Дайте характеристику таких фізичних величин, як кількість речовини; молярна маса.



### Вправа № 26

- На поверхню води капнули краплю оливкової олії об'ємом  $1 \text{ mm}^3$  (див. рисунок). Розплившись, олія утворила плівку площею  $0,6 \text{ m}^2$ . Оцініть розмір молекули оливкової олії.
- Скільки молекул міститься у воді об'ємом  $1,0 \text{ л}$ ?
- Для кожної з поданих речовин визначте молярну масу; число молекул у  $100 \text{ моль}$ ; кількість молів в  $1 \text{ кг}$ ; масу однієї молекули:  
а) азот ( $\text{N}_2$ ); б) вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ); в) метан ( $\text{CH}_4$ ).
- У ставок середньою глибиною  $2 \text{ м}$  і площею водної поверхні  $15\,000 \text{ m}^2$  капнули кристалик йоду масою  $6 \text{ мг}$ . Уявіть, що воду у ставку перемішали і йод рівномірно розподілився по всьому об'єму води. Скільки атомів Йоду виявилося б у кожній пробі води об'ємом  $200 \text{ см}^3$ ?
- Скориставшись додатковими джерелами інформації, знайдіть цікаві приклади, які пояснюють, наскільки малі атоми та молекули. Підготуйте коротке повідомлення або презентацію.



### Експериментальне завдання

Проведіть дослід, подібний зображеному на рисунку до вправи № 26, та оцініть розмір молекули олії експериментально. *Підказки:* 1) поверхня води, по якій розтікається крапля, повинна мати досить велику площа (не менше  $1 \text{ m}^2$ ); 2) об'єм краплі можна знайти за допомогою шприца, полічивши, наприклад, скільки крапель міститься в  $1 \text{ мл}$  олії.

### ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО МЕДИЦИНА



### Молекулярний діетолог

фахівець із розробки індивідуальних схем харчування, заснованих на даних про молекулярний склад іжі, з урахуванням генетичного аналізу людини й особливостей її фізіологічних процесів

Молекулярний діетолог розглядає поведінку молекул у певних середовищах, їх вплив на фізіологічні процеси в організмі людини; з'ясовує витрати енергії під час бігу, ходьби, плавання та іншої рухової активності людини; розраховує, які саме харчі та в якій кількості потрібні людині для отримання необхідної енергії.

## § 27. РУХ І ВЗАЄМОДІЯ МОЛЕКУЛ\*



«...Швидко пролітають у полі зору мікроскопа дрібні частинки, майже миттєво змінюючи напрямок руху, повільніше рухаються більші, але й вони безперервно змінюють напрямок. Великі частинки практично топчуться на місці <...>. Ніде немає й сліду системи або порядку...» Таким, за словами німецького фізика Роберта Поля (1884–1976), постає перед спостерігачем броунівський рух — явище, яке пояснюється рухом молекул. Згадаємо, як рухаються молекули і які факти підтверджують їх взаємодію.

### 1 Що таке броунівський рух\*

**Броунівський рух** — хаотичний рух видимих у мікроскоп малих макрочастинок, завислих у рідині або газі, який відбувається під дією ударів молекул рідини або газу.

Це явище назване на честь шотландського ботаніка *Роберта Броуна* (1773–1858), який першим спостерігав його в 1827 р. Розглядаючи в мікроскоп завислі у воді пилкові зерна, Броун помітив, що вони безперервно рухаються, постійно змінюючи швидкість.

Причина броунівського руху — **хаотичний рух молекул середовища**. Рухаючись, мікрочастинки середовища безперервно бомбардують завислу в ньому макрочастинку (рис. 27.1). При цьому сумарна сила ударів з одного боку може випадково виявитися більшою, ніж з іншого боку. Якщо макрочастинка досить мала ( $\approx 1$  мкм), то внаслідок ударів вона починає рух; потім інші поштовхи спричиняють зміну її швидкості.



Чому більші частинки «топчуться» на місці?

Чому зі збільшенням температури рідини швидкість руху броунівської частинки збільшується?

Теорія броунівського руху, створена *А. Ейнштейном* і польським фізиком *М. Смолуховським* у 1905–1906 рр. та експериментально підтверджена французьким фізиком *Ж. Перреном* (рис. 27.2), остаточно закріпила перемогу атомістики.

### 2 Що таке дифузія і де її застосовують

Безперервний хаотичний рух молекул відбувається всередині будь-якого макроскопічного

\* Тут і далі терміном «молекула» будемо позначати будь-яку структурну одиницю речовини: молекулу, атом чи іон.

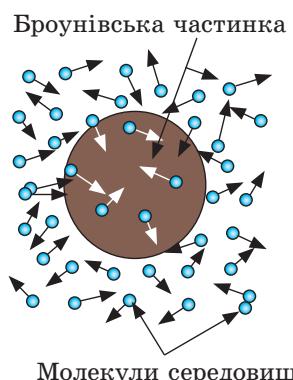


Рис. 27.1. Механізм виникнення броунівського руху

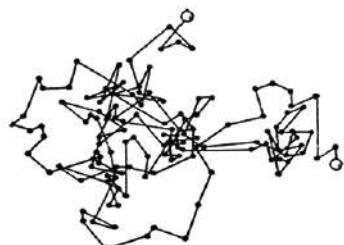
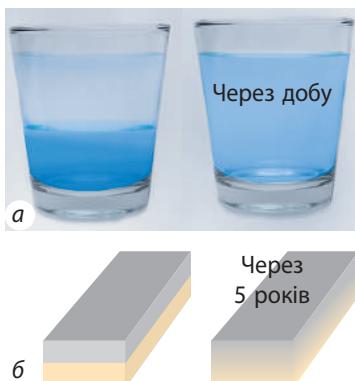


Рис. 27.2. Одна з тисячі схем, отриманих Жаном Перреном, який позначав положення броунівської частинки через рівні (1 с) інтервали часу. Зрозуміло, що справжня траєкторія руху частинки містить ще більше ланок



**Рис. 27.3.** Дифузія в рідинах і твердих тілах. Унаслідок теплового хаотичного руху молекул сироп змішався з водою протягом доби (а), дві відшліфовані та притиснуті одна до одної пластинки свинцю та золота «зрослися» на 1 мм протягом 5 років (б)



**Рис. 27.4.** Процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем називають цементацією. Якщо виготовити деталь із низьковуглецевої сталі, а потім помістити її у високотемпературну суміш, яка містить вуглець, то завдяки дифузії поверхневий шар сталі збагатиться вуглецем. Отримана деталь одночасно буде твердою (звіні — міцний чавун) і не буде руйнуватися внаслідок ударних навантажень (усередині — пружна сталь)

тіла. У курсі фізики 7 класу ви вивчали *дифузію* — ще одне явище, зумовлене таким рухом (від латин. *diffusio* — поширення, розтікання).

**Дифузія** — процес взаємного проникнення молекул однієї речовини між молекулами іншої, який відбувається внаслідок теплового руху цих молекул.

Якщо в склянку з водою налити підфарбований цукровий сироп, через деякий час уся вода в склянці набуде кольору та стане солодкою (рис. 27.3, а). Дифузія в рідині відбувається досить повільно, проте у твердих тілах дифузія повільніша в сотні й тисячі разів (рис. 27.3). У газах дифузія йде набагато швидше, ніж у рідинах, але все одно: якби не було конвекції, запах парфумів поширювався б у кімнаті протягом годин.

*У будь-яких середовищах швидкість дифузії збільшується з підвищеннем температури і тиску.*

Дифузійні процеси надзвичайно важливі для одержання та оброблення деяких матеріалів. Дифузія у твердих тілах забезпечує з'єднання металів під час зварювання, паяння, нікелювання. За допомогою дифузії поверхневий шар металевих виробів насичують вуглецем, забезпечуючи їх міцність (рис. 27.4).

Різновидом дифузії є **осмос** (від грец. *osmos* — поштовх, тиск) — процес однобічної дифузії крізь напівпроникну перегородку (мембрани) молекул розчинника в бік більшої концентрації розчиненої речовини. Наприклад, якщо гострим ножем відрізати скибку лимона, то сік практично не виділиться; якщо ж посипати скибку цукром, то з'явиться сік. Виділяючись із лимона, сік ніби прагне розбрати концентрований розчин цукру, що утворився на зрізі.

У природі завдяки осмосу поживні речовини та вода проникають із ґрунту в корені рослин, із травного тракту — в організми істот і безпосередньо в клітини; кисень із легеневих альвеол надходить у кров тощо. У промисловості осмос використовують для очищення води, виробництва напоїв, отримання деяких полімерів.

### 3 Як швидко рухаються молекули

Молекули в газах рухаються дуже швидко — зі швидкістю кулі (див. таблицю), але далеко «полетіти» не можуть, бо щосекунди зазнають понад мільярд зіткнень з іншими молекулами. Тому траекторії руху молекул являють собою складні ламані лінії, подібні до траекторії руху броунівської частинки.

Поясніть, чому, незважаючи на величезну швидкість руху молекул, запах у повітрі поширюється досить повільно.

*Зверніть увагу! У речовині завжди є молекули, які рухаються повільно, і молекули, швидкість руху яких величезна. Унаслідок зіткнень швидкості руху молекул безперервно змінюються. Описати рух навіть однієї молекули неможливо, та й не потрібно. Нам важливо знати, до якого результату приводить рух усієї сукупності молекул певного об'єкта.*

#### Як було виміряно швидкість руху молекул

Уперше швидкість руху молекул вимірював німецький фізик *Ото Штерн* (1888–1969) у 1920 р.

Для досліду Штерн виготовив пристрій (див. рис. 1), що складався з двох жорстко пов'язаних порожніх циліндрів, надітих на спільну вісь; стінка внутрішнього циліндра мала щілину. Уздовж осі була натягнута металева нитка, вкрита шаром срібла. Повітря з циліндрів було відкачано. Коли по нитці пропускали струм, срібло випаровувалось і внутрішній циліндр заповнювався атомами Аргентуму, частина яких проходила через щілину й осідала на внутрішній стінці зовнішнього циліндра. У результаті навпроти щілини утворювалася тонка смужка срібла (A на рис. 2).



Рис. 1

Коли циліндрам надавали обертання, смужка срібла ставала розмитою й утворювалася не навпроти щілини, а на певній відстані  $s$  від смужки A (смужка A'). Адже поки атоми проходили відстань  $l$  (див. рис. 2), цилінди поверталися на певний кут. Чим швидше рухалися атоми, тим ближче до смужки A вони осідали.

Знаючи радіуси циліндрів, кутову швидкість  $\omega$  їхнього обертання та вимірювши відстань  $s$ , Штерн визначив швидкості  $v$  руху атомів Аргентуму.

Справді, час руху атомів від щілини до зовнішнього циліндра дорівнює  $t = \frac{l}{v} = \frac{R_2 - R_1}{v}$ . За цей час точка на поверхні зовнішнього циліндра проходить відстань  $s$ , тому  $t = \frac{s}{v_{\text{п}}} = \frac{s}{\omega R_2}$ . Таким чином,

$$\frac{R_2 - R_1}{v} = \frac{s}{\omega R_2} \Rightarrow v = \frac{\omega R_2 (R_2 - R_1)}{s}.$$

Швидкість руху атомів, виміряна Штерном, збіглася зі швидкістю, розрахованою теоретично.

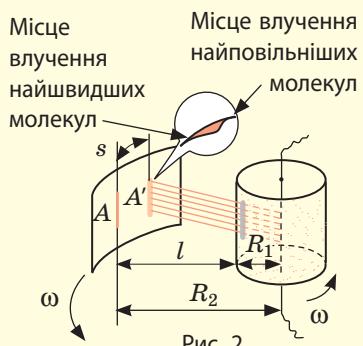
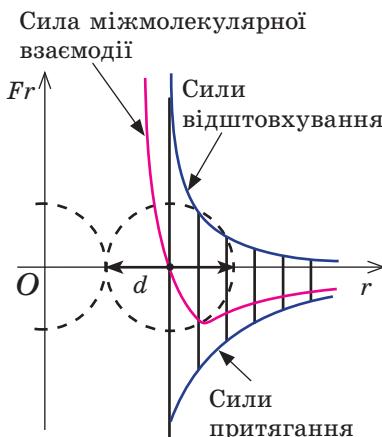


Рис. 2



**Рис. 27.5.** Графіки залежності сил притягання, сил відштовхування та сил міжмолекулярної взаємодії ( $F_r$ ) від відстані  $r$  між молекулами. Сила міжмолекулярної взаємодії обчислюється як алгебраїчна сума сил відштовхування та сил притягання

Якщо відстань  $r$  між молекулами менша від розмірів  $d$  самих молекул ( $r < d$ ), то переважають сили відштовхування, тому молекули відштовхуються одна від одної (рис. 27.5). У міру збільшення відстані  $r$  і сили притягання, і сили відштовхування зменшуються, але сили відштовхування зменшуються швидше. За відстані  $r = d$  сили притягання і сили відштовхування врівноважуються. У разі подальшого збільшення відстані між молекулами ( $r > d$ ) починають переважати сили притягання й молекули притягуються одна до одної.

Таким чином, на відстані  $d$  молекули перебувають у стані стійкої рівноваги: в разі будь-яких відхилень молекули від цього положення міжмолекулярні сили прагнуть повернути її в стан рівноваги.



Чи помітною буде сила взаємодії між двома молекулами, якщо відстань між ними буде вдесятеро більша за розмір молекул? вдесятеро менша (див. рис. 27.5)?

## 4 Як і чому взаємодіють молекули

Переконатися в тому, що молекули притягуються одна до одної, досить просто. Спробуйте, наприклад, розірвати сталевий дріт або розламати цегlinу — це буде складно, хоча вони й складаються з окремих частинок. Той факт, що тверді тіла й рідини не розпадаються на окремі молекули, перетворюючись на газ, теж говорить про те, що між молекулами існують сили притягання. Разом із тим молекули відштовхуються одна від одної. У цьому легко переконатися, спробувавши стиснути той самий дріт або ту саму цегlinу, — навряд чи вам це вдасться.

МКТ стверджує, що між молекулами одночасно існують як сили притягання, так і сили відштовхування. Основна причина виникнення цих сил — електричне притягання та відштовхування заряджених частинок, які утворюють атом: позитивно заряджене ядро одного атома притягується до негативно зарядженої електронної хмари іншого атома; разом із тим ядра цих атомів відштовхуються одне від одного, відштовхуються і їх електронні хмари.

## 5 Фазові стани речовини

В МКТ розрізняють три *фазові (агрегатні) стани речовини*: *рідкий, кристалічний, газоподібний* (існує і четвертий стан — *плазма*, він найпоширеніший у Всесвіті, адже саме у стані плазми перебуває речовина в зорях). Змінення фазового стану називають *фазовим переходом*. Розглянемо різні стани речовини і з'ясуємо особливості руху та взаємодії молекул речовини в різних фазових станах.

Фазові (агрегатні) стани речовини		
Газоподібний	Рідкий	Твердий кристалічний
Слово «газ» походить від грецького слова <i>chaos</i> («хаос»). Молекули газів розташовані безладно й на відстанях, які в десятки разів більші за розміри самих молекул. На таких відстанях молекули практично не взаємодіють одна з одною. Тому, безперервно зіштовхуючись, молекули газів розлітаються в усі боки доти, доки не зустрінуть якусь перешкоду, наприклад стінки посудини. Саме тому гази не мають форми та займають увесь наданий об'єм. Великими відстанями між молекулами пояснюється й той факт, що гази легко стискаються.	Молекули рідини в цілому розташовані хаотично, однак у розташуванні найближчих молекул зберігається певний (ближній) порядок. Середня відстань між молекулами приблизно дорівнює розмірам самих молекул, тому міжмолекулярні сили втримують їх біля положення рівноваги. Кожна молекула рідини певний час (порядку $10^{-11}$ с) здійснює рух, подібний до коливального, потім перескакує в інше місце і знову коливається біля нового положення рівноваги. Час «осідлого життя» молекули в сотні разів більший за час «переходу». Перескакування (переходи) молекул з одного рівноважного стану в інший відбуваються переважно в напрямку зовнішньої сили, тому рідина плинна: під дією зовнішніх сил вона набуває форми тієї посудини, в якій міститься, при цьому об'єм рідини залишається незмінним.	У речовині, що перебуває в твердому кристалічному стані, молекули розташовані в певному порядку (утворюють кристалічну гратку) на відстанях, що приблизно дорівнюють розмірам самих молекул, тому сили міжмолекулярної взаємодії втримують їх біля положення рівноваги. На відміну від рідин, перескакування молекул у твердих тілах відбуваються дуже рідко — кожна молекула зберігає положення рівноваги досить довго, а її рух зводиться до коливання біля положення рівноваги. Тому тверді тіла зберігають і об'єм, і форму; як і рідину, їх дуже важко стиснути.

Зазначимо, що молекули деяких твердих тіл у цілому розташовані безладно. Такий стан речовини називають **аморфним**. Речовини в аморфному стані нагадують дуже в'язкі рідини. Якщо покласти в посудину кристалики солі, вони ніколи не зберуться в один великий кристал. А от якщо покласти в посудину шматочки смоли, яка є аморфною речовиною, то через кілька днів смола зіллеться і набуде форми посудини.

На відміну від кристалічних, **аморфні речовини не мають певної температури плавлення**, а переходять у рідкий стан поступово розм'якшуючись.

Аморфний стан речовин є порівняно хитким — поступово відбувається кристалізація. Так, скло має аморфну структуру, але згодом у ньому утворюються помутніння — дрібні кристалики кварцу. Цукор — це молекулярний кристал. Якщо його розплавити та остудити, утвориться льодянник — аморфний стан цукру. А через якийсь час у льодяннику почнуть рости кристалики цукру. Саме з цієї причини зацукровується варення, яке довго простояло.



## Підбиваємо підсумки

- Молекули, атоми, іони перебувають у безперервному хаотичному русі. Саме рухом частинок речовини можна пояснити такі явища, як броунівський рух (видиме в мікроскоп хаотичне переміщення малих макрочастинок, завислих у рідині або газі) та дифузія (взаємне проникнення дотичних речовин одна в одну).
- Частинки речовини взаємодіють одна з одною. Основна причина міжмолекулярної взаємодії — електричне притягання та відштовхування заряджених частинок, що утворюють атом. На відстанях, які більші за розміри молекул, молекули притягуються одна до одної; на відстанях, які незначно менші за розміри молекул, — відштовхуються.
- Речовина може перебувати у твердому, рідкому та газоподібному фазових (агрегатних) станах залежно від того, як розташовані, як рухаються та як взаємодіють її частинки.



## Контрольні запитання

1. У чому причина броунівського руху? 2. Що таке дифузія? Наведіть приклади проявів і застосування дифузії в науці, техніці, природі, житті людини.
3. Чи є правильним твердження, що швидкості руху молекул певного газу за однакової температури є однаковими? 4. У чому причина міжмолекулярної взаємодії? 5. За яких умов між молекулами виявляються сили міжмолекулярного притягання? відштовхування? 6. Поясніть фізичні властивості речовин у різних фазових станах із точки зору МКТ. 7. У чому відмінності аморфного і кристалічного станів речовини?



## Вправа № 27

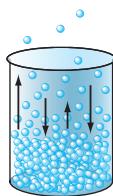
1. Чому вуглекислий газ, який ми вдихаємо, не залишається біля нас, а розсіюється в просторі?
2. Яким фізичним явищем пояснюється процес засолювання огірків? Як відбувається цей процес? У якому приміщенні — теплому чи холодному — огірки засолюються швидше?
3. З'ясовано, що через стінки капілярів в організмі людини переміщується 60 л рідини за хвилину. Завдяки якому фізичному явищу це відбувається?
4. Є два способи підживлення рослин: поливання спеціальними розчинами (прикореневе підживлення); обприскування (позакореневе підживлення). Поясніть обидва способи.
5. Якщо покласти одне на одне два віконних скла, їхні поверхні злипнуться (саме тому під час зберігання між ними кладуть папір). Якщо притиснути одну до одної дві дерев'яні лінійки, вони не злипнуться. Чому?
6. Чи буде горіти свічка в космічному кораблі? Якщо буде, то як довго? Обґрунтуйте свою відповідь.
7. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, яке значення мають процеси дифузії (зокрема, осмосу) в кулінарії. Чому технологія приготування їжі потребує розуміння сутності цих процесів?



## Експериментальне завдання

Продумайте та проведіть досліди зі спостереження дифузії та осмосу в домашніх умовах. З'ясуйте, від яких чинників залежить швидкість дифузії.

## § 28. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МКТ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ



Кожне макроскопічне тіло складається з величезної кількості молекул. МКТ розглядає будову та властивості макроскопічних тіл, а також процеси, що відбуваються в цих тілах, з точки зору їх молекулярної структури. Поведінку макроскопічних тіл описують низкою фізичних величин — *мікроскопічними і макроскопічними параметрами*. З'ясуємо, що це за параметри і як вони пов'язані.

### 1 Мікроскопічні і макроскопічні параметри

Розглянемо систему, що складається з дуже великої кількості атомів або молекул. Такою системою, наприклад, може бути якийсь газ. У будь-який момент часу кожна мікрочастинка газу має енергію, рухається з деякою швидкістю, має певну масу.

Фізичні величини, які характеризують властивості та поведінку окремих мікрочастинок речовини, називають **мікроскопічними параметрами**.

Мікроскопічні параметри можуть змінюватися без зовнішнього впливу на систему. Наприклад, швидкості руху молекул газу безперервно змінюються в результаті їх зіткнень одна з одною.

Водночас газ даної маси займає деякий об'єм, має певні тиск, температуру. Значення цих фізичних величин визначаються сукупністю величезної кількості молекул, — наприклад, ми не можемо говорити про тиск, температуру або густину однієї молекули.

Фізичні величини, які характеризують властивості та поведінку макроскопічних тіл без урахування їх молекулярної будови, називають **макроскопічними параметрами**.

Макроскопічні параметри можуть змінюватися тільки за рахунок зовнішніх впливів на систему або за рахунок теплообміну. Так, щоб збільшити тиск газу, його потрібно нагріти (передати певну кількість теплоти) або стиснути (тобто виконати роботу).

### 2 Який газ називають ідеальним

Кількісні закономірності, що пов'язують макроскопічні і мікроскопічні параметри тіл, є досить складними. Розглянемо найпростіший випадок — доволі розріджені гази (такими, наприклад, є звичайні гази за нормальніх умов\*). У розріджених газах відстань між молекулами в багато разів перевищує розміри самих молекул, тому ці молекули можна вважати матеріальними точками, а їхньою взаємодією, за винятком моментів зіткнення, можна знехтувати. Крім того, властивості розріджених газів практично не залежать від їхнього молекулярного складу, а зіткнення молекул такого газу наближаються до пружних. Таким чином, замість реальних газів можна розглядати їх фізичну модель — *ідеальний газ*.

\* Газ перебуває за *нормальних умов*, якщо його тиск 760 мм. рт. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па і температура 0 °C.

**Ідеальний газ** — це фізична модель газу, молекули якого приймають за матеріальні точки, що не взаємодіють одна з одною на відстані та пружно взаємодіють у моменти зіткнення.

3

### Основне рівняння МКТ ідеального газу

Почнемо з такого мікроскопічного параметра, як *швидкість руху молекул*. Звернемо увагу на те, що немає сенсу розглядати рух кожної окремої молекули та встановлювати швидкість її руху в даний момент часу, та це й неможливо: число молекул величезне, і за секунду кожна молекула змінює швидкість свого руху мільярди разів. Тому фізики використовують середні значення швидкостей молекул. Найважливішим у МКТ є поняття **середній квадрат швидкості** ( $\overline{v^2}$ ):

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N},$$

де  $N$  — число молекул;  $v_1, v_2, \dots, v_N$  — швидкості руху окремих молекул.

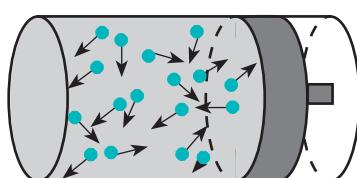
Квадратний корінь із середнього квадрата швидкості називають **середньою квадратичною швидкістю руху молекул** ( $\bar{v}_{\text{кв}}$ ):

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{v^2}}$$

Зрозуміло, що середній квадрат швидкості (а отже, і середню квадратичну швидкість) неможливо визначити за допомогою прямих вимірювань. Проте ця величина пов'язана з певними макроскопічними (вимірюваними) параметрами газу, наприклад із тиском.

Нагадаємо, що тиск газу зумовлений ударами його молекул (рис. 28.1). Переїдуваючи в безперервному хаотичному русі, молекули газу зіштовхуються зі стінками посудини і поверхнею будь-якого тіла в газі, діючи на них з деякою силою. Сумарна сила дії частинок на одиницю площини поверхні і є тиском газу:  $p = \frac{F}{S}$ .

Неважко здогадатися: чим швидше рухаються молекули газу і чим більшою є маса цих молекул, тим більшою буде сила їх ударів і тим більший тиск створюватиме газ.



**Рис. 28.1.** Тиск газу є результатом зіткнення молекул газу зі стінками посудини

Рівняння залежності тиску  $p$  ідеального газу від маси  $m_0$  його молекул і середнього квадрата швидкості  $\overline{v^2}$  їх руху — це **основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу**:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}$$

Тут  $n$  — **концентрація молекул газу** — фізична величина, яка дорівнює числу молекул в одиниці об'єму газу:  $n = \frac{N}{V}$ ,  $[n] = 1 \text{ м}^{-3}$ .

?

Поясніть, чому тиск газу збільшується зі збільшенням концентрації молекул.

Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу (кінетична енергія поступального руху, що в середньому припадає на одну молекулу) дорівнює:  $\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ . Тому основне рівняння МКТ ідеального газу можна записати і так:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$$

?

Середня кінетична енергія поступального руху молекул деякого газу дорівнює  $1,2 \cdot 10^{-21}$  Дж. Знайдіть кінетичну енергію поступального руху всіх молекул 1 моль цього газу.

#### 4 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте густину ідеального газу, який перебуває під тиском  $1,0 \cdot 10^5$  Па, якщо середня квадратична швидкість руху його молекул  $500$  м/с.

**Дано:**

$$p = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\bar{v}_{\text{кв}} = 500 \text{ м/с}$$

$$\rho = ?$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* У задачі потрібно знайти макроскопічний параметр — густину газу. Для розв'язання задачі скористаємося основним рівнянням МКТ ідеального газу:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2. \quad (1)$$

Оскільки  $\rho = \frac{m}{V}$ , а  $m = N m_0$  (маса газу дорівнює добутку числа молекул газу на масу однієї молекули), то  $\rho = \frac{N m_0}{V} = n m_0$ , де  $n = \frac{N}{V}$  — концентрація молекул газу.

Замінивши у формулі (1) вираз  $n m_0$  на  $\rho$ , маємо:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2. \quad (2)$$

Звідси  $\rho = \frac{3p}{\bar{v}^2} = \frac{3p}{v_{\text{кв}}^2}$ . (Формулу (2) слід запам'ятати!)

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\rho] = \frac{\text{Па}}{\text{м}^2 / \text{с}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho = \frac{3 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{500^2} = \frac{3,0 \cdot 10^5}{2,5 \cdot 10^5} = 1,2 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

*Аналіз результату.* Густини газів за нормальніх умов коливаються від  $0,09$  до  $1,5$  кг/м<sup>3</sup>, тобто одержано реальний результат.

*Відповідь:*  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .



#### Підбиваємо підсумки

- Фізичні величини, які характеризують властивості та поведінку окремих мікрочастинок речовини, називають мікроскопічними параметрами. Фізичні величини, які характеризують властивості та поведінку макроскопічних тіл без урахування іх молекулярної будови, називають макроскопічними параметрами.

- Ідеальний газ — це фізична модель газу, молекули якого приймають за матеріальні точки, що не взаємодіють одна з одною на відстані та пружно взаємодіють у момент зіткнення.
- Основне рівняння МКТ ідеального газу пов'язує макроскопічний параметр (тиск) із мікрокопічними параметрами (масою та середнім квадратом швидкості руху молекул):  $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$ . Це рівняння можна записати у вигляді:  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$ ;  $p = \frac{1}{3} \rho \bar{u}^2$ .

### Контрольні запитання



1. Дайте означення макроскопічних і мікрокопічних параметрів. Наведіть приклади.
2. Дайте означення ідеального газу.
3. Що таке середній квадрат швидкості руху молекул? середня квадратична швидкість руху молекул?
4. Чому газ тисне на стінки посудини?
5. Які параметри пов'язує основне рівняння МКТ ідеального газу? Запишіть це рівняння.
6. Яким співвідношенням пов'язані тиск і середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу? тиск і густина ідеального газу?



### Вправа № 28

1. Дано такі параметри газу: тиск; об'єм; температура; середня квадратична швидкість руху молекул; маса молекули; густина.
  - 1 Які з цих параметрів є мікрокопічними? макроскопічними?
  - 2 Отвір порожнього шприца без голки затиснули пальцем, а потім: а) по-вільно натиснули на поршень; б) різко відтягнули поршень. Які з наведених параметрів газу і як при цьому змінилися?
2. Як змінився тиск ідеального газу, що міститься в закритій посудині, якщо внаслідок нагрівання середня квадратична швидкість руху його молекул збільшилась у 2 рази?
3. Унаслідок стискання об'єм ідеального газу зменшився в 3 рази, а середня кінетична енергія його молекул збільшилася в 3 рази. Як змінився тиск газу?
4. Середня квадратична швидкість руху молекул ідеального газу дорівнює 400 м/с. Який об'єм займає цей газ масою 2,5 кг, якщо його тиск дорівнює 1 атм?
5. Азот масою 2,5 кг у посудині об'ємом 2,0 м<sup>3</sup> чинить тиск 1,5·10<sup>5</sup> Па. Визначте середню кінетичну енергію поступального руху молекул азоту.

### Фізика і техніка в Україні



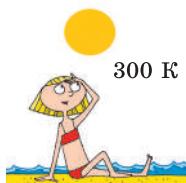
**Ісаак Якович Померанчук** (1913–1966) — український радянський фізик-теоретик, академік.

Починав працювати в Харківському фізико-технічному інституті під керівництвом Л. Д. Ландау.

I. Я. Померанчук досяг видатних результатів у різних галузях сучасної фізики — у фізиці твердого тіла (розсіяння нейtronів у кристалах, теорія теплопровідності діелектриків); у фізиці квантових рідин («ефект Померанчука»); у квантовій теорії поля («теорема Померанчука»), у фізиці гравітації високих енергій, теорії космічних променів. Учений зробив вагомий внесок у теорію та створення перших ядерних реакторів, зокрема в дифузійну теорію реактора.

На честь I. Я. Померанчука названо псевдочастинку *померон*.

## § 29. ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНА ШКАЛА КЕЛЬВІНА



Перш ніж, наприклад, піти на пляж, багато хто цікавиться прогнозом погоди. І якщо очікується температура повітря 10 °C, то, наймовірніше, плани буде змінено. А чи варто відмовлятися від прогулянки, якщо прогнозується температура 300 K (кельвінів)? І що насправді вкладають фізики в поняття «температура»?

### 1 Що таке температура

Експерименти показують, що в цілій низці випадків макроскопічна система переходить із одного стану в інший. Наприклад, якщо в морозний день занести в кімнату кульку, наповнену гелем, то гелій у кульці буде поступово нагріватись і при цьому змінюватимуться тиск, об'єм і деякі інші параметри газу. Після того як кулька пробуде в кімнаті певний час, зміни припиняться. Один із постулатів молекулярної фізики і термодинаміки — його ще називають **нульове начало термодинаміки** — стверджує: *будь-яке макроскопічне тіло або система тіл за незмінних зовнішніх умов самочинно переходять у термодинамічний рівноважний стан (стан теплової рівноваги), після досягнення якого всі частини системи мають однакову температуру.*

Нульове начало термодинаміки фактично вводить і визначає поняття **температури**.

**Температура** — фізична величина, яка характеризує стан теплової рівноваги макроскопічної системи.

**Стан теплової рівноваги** — це такий стан макроскопічної системи, коли всі макроскопічні параметри системи залишаються незмінними як завгодно довго.

*Зверніть увагу!* У стані теплової рівноваги всі частини системи мають однакову температуру, при цьому їхні інші макроскопічні параметри можуть бути різними. Згадайте приклад із кулькою: після того як встановиться теплова рівновага, температура навколошнього повітря і температура гелю в кульці будуть однаковими, а тиск, густина та об'єм — різними.

### 2 Як працюють термометри

Температура — це фізична величина, отже, її можна вимірювати. Для цього треба встановити *шкулу температур*. Найпоширенішими температурними шкалами є шкали Цельсія, Кельвіна, Фаренгейта (рис. 29.1).

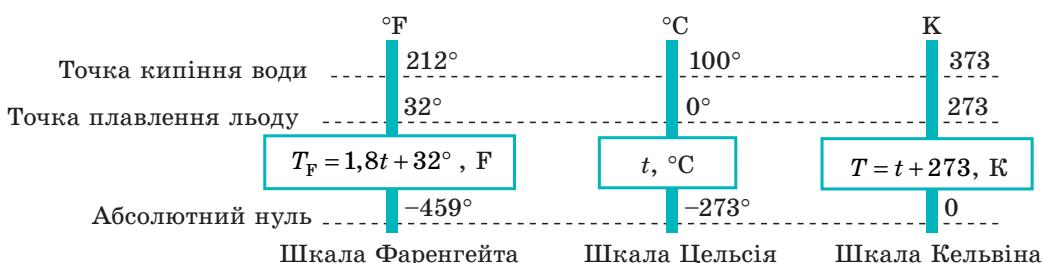
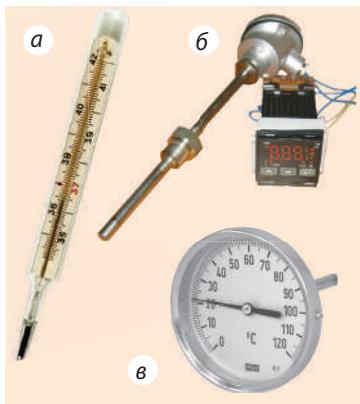


Рис. 29.1. Сучасні температурні шкали



**Рис. 29.2.** Різні види термометрів і принципи їх дії:  
 а — рідинний (зміна об'єму рідини зі зміною температури);  
 б — термометр опору (зміна опору провідника зі зміною температури);  
 в — біметалевий деформаційний (зміна довжин двох різних металевих пластин зі зміною температури)

Побудова шкали температур починається з вибору *реперних (опорних) точок*, що мають бути однозначно пов'язані з якимись фізичними процесами, які легко відтворити. Наприклад, за *нульову точку температурної шкали Цельсія* взято *температуру танення льоду* за нормального атмосферного тиску ( $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). *Температуру кипіння води* за нормального атмосферного тиску приписують значення  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . *Одиниця температури за шкалою Цельсія — градус Цельсія*:

$$[t] = 1\text{ }^{\circ}\text{C }(^{\circ}\text{C}).$$

Прилади для вимірювання температури — **термометри** (рис. 29.2). Основними частинами будь-якого термометра є *термометричне тіло* (ртуть або спирт у рідинному термометрі, біметалева пластина в металевому деформаційному термометрі тощо) і *шкала*. Якщо термометричне тіло привести в тепловий контакт із тілом, температуру якого потрібно виміряти, то система набуде нерівноважного стану. У процесі переходу в рівноважний стан змінюватимуться деякі макроскопічні параметри термометричного тіла (об'єм, електричний опір тощо). Знаючи, як ці параметри залежать від температури, визначають температуру тіла.

### Зверніть увагу!

- Термометр фіксує *власну температуру*, що дорівнює температурі тіла, з яким термометр перебуває в термодинамічній рівновазі.
- Термометричне тіло не має бути масивним, інакше воно суттєво змінить температуру тіла, з яким контактує.

## 3 Температура і середня кінетична енергія молекул

Те, що температура тіла має бути пов'язана з кінетичною енергією його молекул, випливає з простих міркувань. Наприклад, зі збільшенням температури збільшується швидкість руху броунівських частинок, прискорюється дифузія, збільшується тиск газу, а це означає, що молекули рухаються швидше і їх кінетична енергія стає більшою. Можна припустити: *якщо гази перебувають у стані теплової рівноваги, то середні кінетичні енергії молекул цих газів будуть однаковими*. Але як це довести, адже безпосередньо виміряти ці енергії неможливо?

Звернемося до основного рівняння МКТ ідеального газу:  $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k$ . За

означенням  $n = \frac{N}{V}$ , тому  $p = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\bar{E}_k$ . Після перетворень маємо:  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\frac{pV}{N}$ .

Таким чином, щоб експериментально перевіритись у рівності середніх кінетичних енергій молекул різних газів за однакової температури, потрібно вимірюти об'єми ( $V$ ), тиски ( $p$ ) та маси ( $m$ ) газів і, знаючи їх молярну масу ( $M$ ), знайти число молекул кожного газу ( $N$ ) за формулою  $N = \frac{m}{M} N_A$ .

Щоб забезпечити однакову температуру, можна, наприклад, занурити балони з різними газами в посудину з водою і дочекатися стану теплової рівноваги (рис. 29.3).

Експерименти показують, що для всіх газів у стані теплової рівноваги відношення  $\frac{pV}{N}$  є однаковим, а отже, однаковими є і середні кінетичні енергії молекул газів. (Відношення  $\frac{pV}{N}$  часто позначають літерою  $\theta$  (тета).)

Наприклад, за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (посудини з газами занурили в лід, що тане)  $\theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ , тобто  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\theta_0 = 5,64 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ ; за температури  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (посудини занурили у киплячу воду)  $\theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ , а  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\theta_{100} = 7,71 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ . Оскільки у стані теплової рівноваги значення  $\theta$  для будь-яких газів є однаковим, то температуру можна вимірювати в джоулях.

## 4

### Абсолютна шкала температур

Зрозуміло, що в джоулях подавати температуру незручно (передусім тому, що значення  $\theta$  дуже малі), до того ж незручно й повністю відмовлятися від шкали Цельсія. У 1848 р. англійський фізик Вільям Томсон (lord Кельвін) (1824–1907) запропонував **абсолютну шкалу температур** (зараз її називають **шкалою Кельвіна**).

Температуру  $T$ , вимірюну за шкалою Кельвіна, називають **абсолютною температурою**.

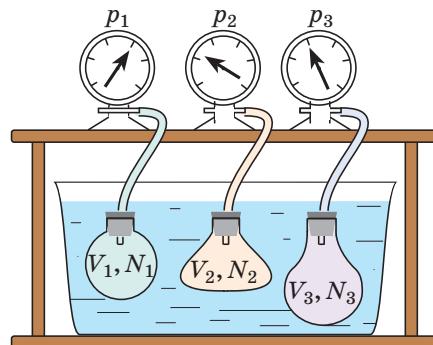
*Одиниця абсолютної температури — кельвін — основна одиниця СІ:*

$$[T] = 1\text{ К (К).}$$

Шкала Кельвіна побудована таким чином, що:

- зміна температури за шкалою Кельвіна дорівнює зміні температури за шкалою Цельсія:  $\Delta T = \Delta t$ , тобто *цина поділки шкали Кельвіна дорівнює ціні поділки шкали Цельсія*:  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ К}$ ; температури, вимірюні за шкалами Кельвіна і Цельсія, пов'язані співвідношеннями:

$$T = t + 273; \quad t = T - 273$$



**Рис. 29.3.** Дослід, який дозволяє встановити зв'язок між температурою і середньою кінетичною енергією поступального руху молекул газу. Гази в посудинах перебувають у стані теплової рівноваги із середовищем, а отже, є один з одним

**Стала Больцмана** названа на честь австрійського фізика *Людвіга Больцмана* (1844–1906). Її значення можна визначити, скориставшись даними для  $\theta_0$  і  $\theta_{100}$ , отриманими в результаті експерименту (див. п. 3 § 29):

- якщо  $t = 100$  °C, то  $\theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21}$  Дж;
- якщо  $t = 0$  °C, то  $\theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21}$  Дж.

Оскільки  $\theta = kT$ , то  $\Delta\theta = k\Delta T$ , отже,

$$k = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{\theta_{100} - \theta_0}{\Delta T}.$$

Враховуючи, що

$$\Delta T = \Delta t = 100 \text{ K},$$

$$\text{а } \theta_{100} - \theta_0 = 1,38 \cdot 10^{-21} \text{ Дж, маємо:}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

- температура за шкалою Кельвіна пов’язана з величиною  $\theta = \frac{pV}{N}$  співвідношенням  $\theta = kT$ , де  $k$  — *стала Больцмана* — коефіцієнт пропорційності, який не залежить від температури, ані від складу та кількості газу:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \left( \frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

Абсолютна температура має глибокий фізичний зміст.

*Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу прямо пропорційна абсолютной температурі:*

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \quad (1)$$

Тобто, якщо газ охолодити до температури  $T = 0$  K, рух його молекул має припинитися ( $\bar{E}_k = 0$ ). Таким чином, нульова точка шкали Кельвіна — це найнижча теоретично можлива температура. Насправді рух молекул не припиняється ніколи, тому досягти температури 0 K (–273 °C) неможливо.

Абсолютну нижню межу температури, за якої рух молекул і атомів має припинитися, називають **абсолютним нулем температури**.

*Тиск  $p$  газу повністю визначається його абсолютною температурою  $T$  і концентрацією  $n$  молекул газу:  $p = nkT$  (2).*



Скориставшись співвідношенням  $\frac{pV}{N} = \theta = kT$  і рівнянням  $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k$ , отримайте формули (1) і (2) самостійно.



### Підбиваємо підсумки

• Фізична величина, яка характеризує стан теплової рівноваги макроскопічної системи, називається температурою. Абсолютну нижню межу температури, за якої рух молекул і атомів має припинитися, називають абсолютним нулем температури. Шкала, за нульову точку якої взято абсолютний нуль температури, називається абсолютною шкалою температур (шкалою Кельвіна). Одиниця абсолютної температури — кельвін (K) — основна одиниця СІ. Температури за шкалами Кельвіна і Цельсія пов’язані співвідношеннями:  $T = t + 273$ ;  $t = T - 273$ .

• Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу прямо пропорційна абсолютної температурі, а тиск газу визначається абсолютною температурою та концентрацією молекул газу:  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$ ;  $p = nkT$ , де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / K — *стала Больцмана*.



## Контрольні запитання

- Сформулюйте нульове начало термодинаміки.
- За яких умов система перебуває в стані теплової рівноваги?
- Дайте означення температури.
- Що таке термометр? Яким є принцип його дії? Які види термометрів ви знаєте?
- Охарактеризуйте температурні шкали Цельсія та Кельвіна. Як вони пов'язані?
- Доведіть, що температура — міра середньої кінетичної енергії руху молекул.
- Як пов'язані тиск газу та абсолютна температура?



## Вправа № 29

- Чому на шкалі Кельвіна відсутні від'ємні температури?
- Найнижча температура на Землі ( $-89^{\circ}\text{C}$ ) була зафіксована в Антарктиді в 1983 р. Подайте цю температуру в кельвінах; у градусах Фаренгейта.
- Абсолютна температура газу, який міститься в закритому балоні, збільшилася в 4 рази. Як при цьому змінилися тиск і середня квадратична швидкість руху молекул газу?
- Скільки молекул газу міститься в кімнаті об'ємом  $150\text{ m}^3$  за тиску 1 атм і температури  $27^{\circ}\text{C}$ ?
- Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтесь: 1) якими були перші термометри; 2) чому після вимірювання температури медичний термометр слід струшувати; 3) з якою точністю можна вимірювати температуру сучасними термометрами.



## § 30. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ІЗОПРОЦЕСИ



Д. Менделєєв



Б. Клапейрон

Рівняння Клапейрона і Менделєєва — Клапейрона; закони Шарля, Ґей-Люссака, Бойля — Маріотта, Авогадро, Дальтона, — мабуть, такої кількості «іменних» законів немає в жодному розділі фізики. За кожним із них — копітка робота в лабораторіях, ретельні вимірювання, тривалі аналітичні міркування й точні розрахунки. Нам набагато простіше. Ми вже знаємо основні положення теорії, і «відкрити» всі вищезгадані закони нам не буде складно.

### 1 Рівняння стану ідеального газу

Тиск газу повністю визначається його температурою та концентрацією молекул:  $p = nkT$ . Запишемо це рівняння у вигляді  $pV = NkT$ . Якщо склад і маса газу відомі, число молекул газу можна знайти зі співвідношення  $N = \frac{m}{M} N_A$ . Після підставлення маємо:  $pV = \frac{m}{M} N_A kT$  (\*).

Добуток числа Авогадро  $N_A$  на сталу Больцмана  $k$  називають **універсальною газовою сталою** ( $R$ ):  $R = N_A k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ ; отже:

$$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$$

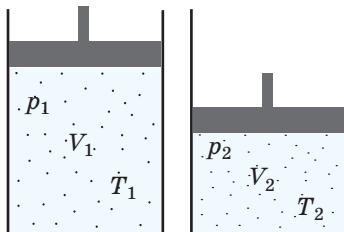


Рис. 30.1. До виведення рівняння Клапейрона

## 2 Рівняння Клапейрона

За допомогою рівняння Менделєєва — Клапейрона можна встановити зв'язок між макроскопічними параметрами газу у випадку його переходу з одного стану в інший. Нехай газ маси  $m$  і молярної маси  $M$  переходить зі стану  $(p_1, V_1, T_1)$  у стан  $(p_2, V_2, T_2)$  (рис. 30.1). Для кожного стану запишемо рівняння Менделєєва — Клапейрона:  $p_1V_1 = \frac{m}{M}RT_1$ ;  $p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_2$ . Розділивши обидві частини першого рівняння на  $T_1$ , а другого — на  $T_2$ , маємо:  $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{m}{M}R$ ;  $\frac{p_2V_2}{T_2} = \frac{m}{M}R$ .

Праві частини цих рівнянь є рівними; прирівнявши ліві частини, одержимо рівняння Клапейрона:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}, \text{ тобто } \frac{pV}{T} = \text{const}$$

Для даного газу деякої маси відношення добутку тиску на об'єм до температури газу є незмінним.

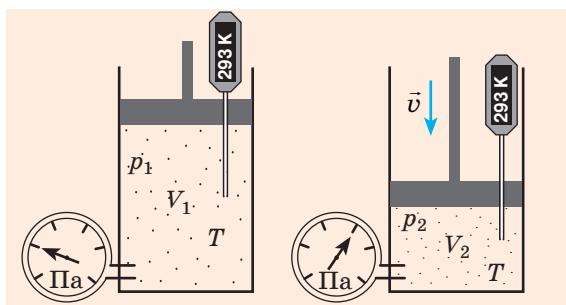
## 3 Ізопроцеси

Процес, у ході якого один із макроскопічних параметрів даного газу деякої маси залишається незмінним, називають **ізопроцесом**. Оскільки стан газу визначеної маси характеризується трьома макроскопічними параметрами, то можливих ізопроцесів також три: процес, що відбувається за незмінної температурі; процес, що відбувається за незмінного тиску; процес, що відбувається за незмінного об'єму. Розглянемо їх.

## 4 Який процес називають ізотермічним. Закон Бойля — Маріотта

Бульбашка повітря, піднімаючись із дна глибокої водойми, може збільшитися в об'ємі в кілька разів, при цьому тиск усередині бульбашки падає, адже внаслідок додаткового гідростатичного тиску води ( $p_{\text{гідр}} = \rho gh$ ) тиск на глибині більший, ніж атмосферний. Температура ж усередині бульбашки практично не змінюється. У цьому випадку маємо справу з процесом *ізотермічного розширення*.

\* Назване на честь російського хіміка й фізика Дмитра Івановича Менделєєва (1834–1907) і французького фізика Бенуа Поля Еміля Клапейрона (1799–1864).



**Рис. 30.2.** Ізотермічне стискання газу. Якщо повільно опускати поршень, температура газу під поршнем буде лишатися незмінною і дорівнюватиме температурі навколошнього середовища. Тиск газу при цьому буде збільшуватися

**Ізотермічний процес** — процес змінювання стану даного газу деякої маси, що відбувається за незмінної температурі.

Нехай деякий газ переходить зі стану  $(p_1, V_1, T)$  у стан  $(p_2, V_2, T)$ , тобто *температура газу залишається незмінною* (рис. 30.2). Тоді згідно з рівнянням Клапейрона має місце рівність  $\frac{p_1 V_1}{T} = \frac{p_2 V_2}{T}$ . Після скорочення на  $T$  отримаємо:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ .

### Закон Бойля — Маріотта\*:

Для даного газу деякої маси добуток тиску газу на його об'єм є незмінним, якщо температура газу не змінюється:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \text{ або } pV = \text{const} = \frac{m}{M} RT$$

*Графіки ізотермічних процесів називають ізотермами.*

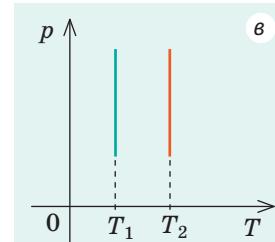
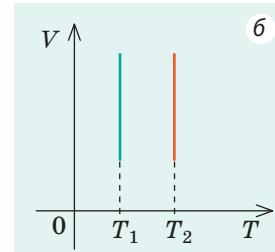
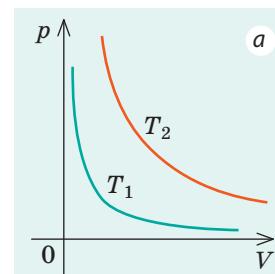
Як випливає із закону Бойля — Маріотта, за незмінної температурі тиск газу даної маси обернено пропорційний його об'єму:  $p = \frac{\text{const}}{V}$ . Цю залежність у координатах  $p, V$  можна подати у вигляді гіперболи (рис. 30.3, а). Оскільки під час ізотермічного процесу температура газу є незмінною, то в координатах  $p, T$  і  $V, T$  ізотерми перпендикулярні до осі температур (рис. 30.3, б, в).

### 5 Який процес називають ізобарним.

#### Закон Ґей-Люсака

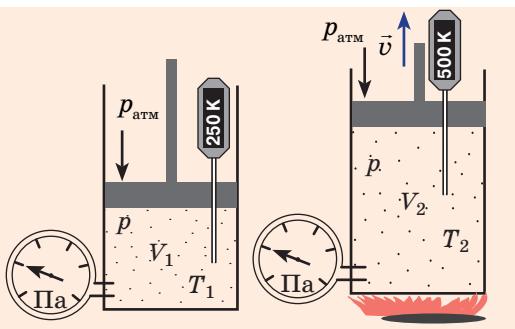
**Ізобарний процес** — процес змінювання стану даного газу деякої маси, що відбувається за незмінного тиску.

Нехай деякий газ переходить зі стану  $(p, V_1, T_1)$  у стан  $(p, V_2, T_2)$ , тобто тиск газу залишається



\* Цей закон незалежно один від одного відкрили ірландський фізик і хімік *Роберт Бойль* (1627–1691) у 1662 р. і французький фізик *Едм Маріотт* (1620–1684) у 1676 р.

**Рис. 30.3.** Графіки ізотермічного процесу;  $T_1 < T_2$



**Рис. 30.4.** Ізобарне розширення газу. Якщо газ перебуває під важким поршнем масою  $M$  і площею  $S$ , який може переміщуватися практично без тертя, то в разі збільшення температури об'єм газу буде збільшуватися, а тиск газу лишатиметься незмінним і дорівнюватиме  $p = p_{\text{атм}} + \frac{Mg}{S}$

незмінним (рис. 30.4). Тоді має місце рівність  $\frac{pV_1}{T_1} = \frac{pV_2}{T_2}$ .

Після скорочення на  $p$  одержимо:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ .

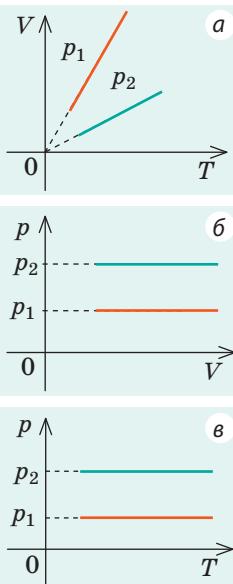
#### Закон Ґей-Люссака\*:

Для даного газу деякої маси відношення об'єму газу до температури є незмінним, якщо тиск газу не змінюється:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \text{ або } \frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p}$$

*Графіки ізобарних процесів називають ізобарами.*

Як випливає із закону Ґей-Люссака, за незмінного тиску об'єм газу даної маси прямо пропорційний його температурі:  $V = \text{const} \cdot T$ . Графіком цієї залежності в координатах  $V, T$  є пряма, що проходить через початок координат (рис. 30.5, а). Із графіка бачимо, що з наближенням до абсолютноного нуля об'єм ідеального газу має зменшитися до нуля. Зрозуміло, що це неможливо, оскільки реальні гази за низьких температур перетворюються на рідини. У координатах  $p, V$  і  $p, T$  ізобари перпендикулярні до осі тиску (рис. 30.5, б, в).



**Рис. 30.5.** Графіки ізобарного процесу. Чим більшим є тиск газу, за якого відбувається ізобарний процес ( $p_2 > p_1$ ), тим менший об'єм займає газ і тим нижче розташована ізобара

## 6

#### Ізохорний процес. Закон Шарля

Якщо газовий балон сильно нагріється на сонці, то тиск у ньому підвищиться настільки, що балон може вибухнути. Тут маємо справу з *ізохорним нагріванням*.

## 7

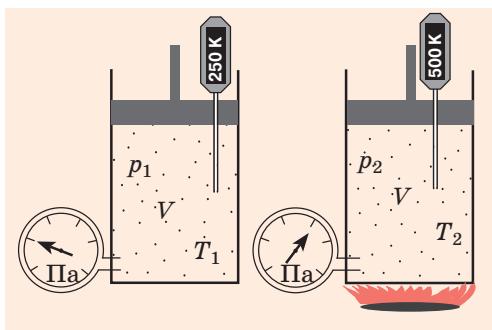
Ізохорний процес — процес змінювання стану даного газу деякої маси, що відбувається за незмінного об'єму.



Чи існує процес «ізохорне розширення»?

Нехай деякий газ переходить зі стану  $(p_1, V, T_1)$  у стан  $(p_2, V, T_2)$ , тобто об'єм газу не змінюється (рис. 30.6).

\* Цей закон експериментально встановив у 1802 р. французький фізик Жозеф Луї Ґей-Люссак (1778–1850).



**Рис. 30.6.** Ізохорне нагрівання газу. Якщо газ перебуває в циліндрі під закріпленим поршнем, то зі збільшенням температури тиск газу теж збільшуватиметься. Дослід показує, що в будь-який момент часу відношення тиску газу до його температури буде незмінним:  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

У цьому випадку має місце рівність  $\frac{p_1V}{T_1} = \frac{p_2V}{T_2}$ . Після скорочення на  $V$  маємо:  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ .

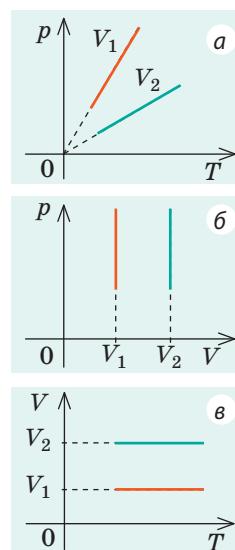
### Закон Шарля\*:

Для даного газу деякої маси відношення тиску газу до його температури є незмінним, якщо об'єм газу не змінюється:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \text{ або } \frac{p}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{V}$$

*Графіки ізохорних процесів називають ізохорами.*

Із закону Шарля випливає, що за незмінного об'єму тиск газу даної маси прямопропорційний його температурі:  $p = \text{const} \cdot T$ . Графіком цієї залежності в координатах  $p$ ,  $T$  є пряма, що проходить через початок координат (рис. 30.7, а). У координатах  $p$ ,  $V$  і  $T$  ізохори перпендикулярні до осі об'єму (рис. 30.7, б, в).



**Рис. 30.7.** Графіки ізохорного процесу: чим більшим є об'єм газу ( $V_2 > V_1$ ), тим менша концентрація цього газу і тим менший тиск він чинить

### 7 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** У вертикальній циліндричній посудині під легкорухомим поршнем міститься 2 моль гелію і 1 моль молекулярного водню. Температуру суміші збільшили у 2 рази, і весь водень розпався на атоми. У скільки разів збільшився об'єм суміші газів під поршнем?

**Дано:**

$$v(H_2) = 1 \text{ моль}$$

$$v(He) = 2 \text{ моль}$$

$$T_2 / T_1 = 2$$

$$V_2 / V_1 = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Суміш газів перебуває під легкорухомим поршнем, тому тиск суміші не змінюється:  $p_1 = p_2$ , але ми не можемо скористатися законом Бойля — Маріотта, адже в результаті дисоціації (розділу) молярна маса і число молів водню збільшується у 2 рази:  $v(H) = 2v(H_2)$ .

**Розв'язання.** Скористаємося рівнянням стану ідеального газу:  $pV = vRT$ . Запишемо це рівняння для станів суміші газів до і після розпаду:  $p_1V_1 = v_1RT_1$  (1);  $p_2V_2 = v_2RT_2$  (2).

\* Цей закон установив у 1787 р. французький учений Александр Сезар Шарль (1746–1823).

Розділивши рівняння (2) на рівняння (1) і врахувавши, що  $p_1 = p_2$ , маємо:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{T_2}{T_1}, \text{ де } v_1 = v(H_2) + v(He) = 1 \text{ моль} + 2 \text{ моль} = 3 \text{ моль};$$

$$v_2 = v(H) + v(He) = 2v(H_2) + v(He) = 2 \text{ моль} + 2 \text{ моль} = 4 \text{ моль}.$$

$$\text{Знайдемо значення шуканої величини: } \frac{V_2}{V_1} = \frac{4}{3} \cdot 2 = \frac{8}{3}.$$

Відповідь: у  $\frac{8}{3}$  разу.

**Задача 2.** На рис. 1 подано графік зміни стану ідеального газу незмінної маси в координатах  $V$ ,  $T$ . Подайте графік цього процесу в координатах  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$ .

### Розв'язання

1. За графіком (рис. 1) з'ясуємо, який ізопроцес відповідає кожній його ділянці; знаючи закони, за якими відбуваються ці процеси, визначимо, як у ході ізопроцесів змінюються макроскопічні параметри газу.

Ділянка 1–2: ізотермічне розширення;  $T = \text{const}$ ,

$V \uparrow$ , отже, згідно із законом Бойля — Маріотта  $p \downarrow$ .

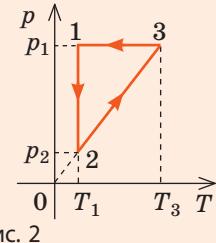
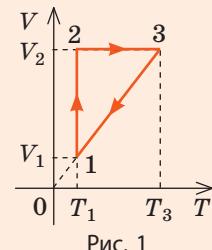
Ділянка 2–3: ізохорне нагрівання;  $V = \text{const}$ ,

$T \uparrow$ , отже, згідно із законом Шарля  $p \uparrow$ .

Ділянка 3–1: ізобарне охолодження;

$p = \text{const}$ ,  $T \downarrow$ , отже, згідно із законом Гей-Люссака  $V \downarrow$ .

2. Зважаючи на те, що точки 1 і 2 лежать на одній ізотермі, точки 1 і 3 — на одній ізобарі, а точки 2 і 3 на одній ізохорі, та використавши результати аналізу, побудуємо графік процесу в координатах  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$  (рис. 2).



### Підбиваємо підсумки

- Зі співвідношення  $p = nkT$  можна одержати низку дуже важливих законів, установлених своєю часу експериментально.
  - ◆ Рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва — Клапейрона):  $pV = \frac{m}{M}RT$ , де  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  — універсальна газова стала.
  - ◆ Рівняння Клапейрона: для даної маси газу відношення добутку тиску на об'єм до температури газу є незмінним:  $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$ , тобто  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ .
  - Ізопроцес — процес, під час якого один із макроскопічних параметрів деякої маси даного газу залишається незмінним.

Ізотермічний, $T = \text{const}$	Ізобарний, $p = \text{const}$	Ізохорний, $V = \text{const}$
Закон Бойля — Маріотта: $p_1V_1 = p_2V_2$	Закон Гей-Люссака: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	Закон Шарля: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$



## Контрольні запитання

1. Які макроскопічні параметри пов'язує рівняння стану ідеального газу?
2. Дайте означення ізопроцесу. 3. Який процес називають ізотермічним? Сформулюйте закон, що характеризує цей процес.
4. Який процес називають ізобарним? Сформулюйте закон, що характеризує цей процес. Опишіть дослід, за допомогою якого можна встановити цей закон.
5. Який процес називають ізохорним? Сформулюйте закон, що характеризує цей процес. Опишіть дослід, за допомогою якого можна встановити цей закон.



## Вправа № 30

1. Як зміниться тиск газу, якщо його температуру збільшити у 2 рази, а об'єм зменшити в 4 рази?
2. Визначте глибину озера, якщо об'єм повітряної бульбашки за час підняття з дна озера на його поверхню збільшується в 3 рази. Атмосферний тиск вважайте нормальним, зміною температури повітря в бульбашці знехтуйте.
3. Перед поїздкою водій накачав шини автомобіля до тиску 2 атм. Під час поїздки температура повітря в шинах збільшилася від 17 до 37 °C. Яким став тиск у шинах наприкінці поїздки?
4. Зобразіть процеси, подані на графіках зміни стану ідеального газу (рис. 1), у координатах:  $V$ ,  $T$  і  $p$ ,  $T$  (рис. 1, а);  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$  (рис. 1, б);  $V$ ,  $T$  і  $p$ ,  $V$  (рис. 1, в).
5. На рис. 2 подано графік зміни стану ідеального газу в координатах  $V$ ,  $T$ . Чи змінюється тиск цього газу? Якщо змінюється, то як?

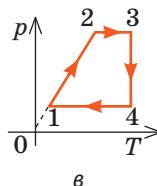
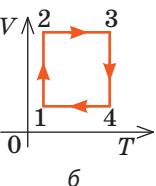
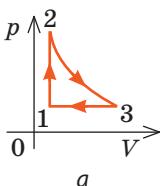


Рис. 1

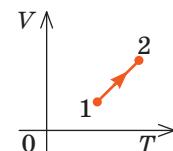


Рис. 2

6. Доведіть закон Авогадро\*: у рівних об'ємах газів за однакової температури міститься однакове число молекул.
7. Доведіть закон Дальтона\*\*: тиск суміші газів, які не взаємодіють один із одним хімічно, дорівнює сумі парціальних тисків\*\*\* цих газів:  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_m$ .



## Експериментальне завдання

Продумайте й проведіть низку дослідів, що підтверджують газові закони, із використанням паперового пакета з-під молока чи соку. Наприклад, якщо порожній пакет, що перебував за кімнатної температури, помістити в холодильник, об'єм повітря в пакеті значно зменшиться (рис. 3).



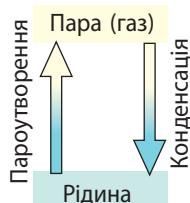
Рис. 3

\* Закон Авогадро був сформульований у 1811 р. італійським фізиком і хіміком Амедео Авогадро (1776–1856).

\*\* Закон Дальтона був сформульований у 1801 р. англійським фізиком і хіміком Джоном Дальтоном (1766–1844).

\*\*\* Парціальний тиск — тиск, який створював би газ, що входить до складу газової суміші, якби за тієї самої температури він один займав би об'єм, який займає суміш.

## § 31. ПАРОУТВОРЕННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ. НАСИЧЕНА І НЕНАСИЧЕНА ПАРА. КИПІННЯ



Будь-яка речовина за певних умов може переходити з одного фазового (агрегатного) стану в інший. Вологой одяг може «замерзнути», а може висохнути, водяна пара може зібратися в крапельки води, утворюючи туман або росу, а може перетворитися на іній. Згадаємо, за яких умов відбувається перехід речовини з рідкого стану в газоподібний і навпаки.

### 1

#### Якими є особливості випаровування рідини

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають **пароутворенням**.

Є два способи переходу рідини в газ: *випаровування і кипіння*.

**Випаровування** — це процес пароутворення з поверхні рідини.

Із точки зору МКТ пароутворення — це такий процес, коли з поверхні рідини вилітають найшвидші молекули. Дійсно, молекули рідини безперервно рухаються (коливаються біля положень рівноваги, час від часу перестрибують із місця на місце), але сили притягання не дають їм розлетітися. Проте в рідині завжди є молекули, кінетична енергія яких у кілька разів перевищує її середнє значення. Коли ці «швидкі» молекули опиняються на поверхні рідини, їх енергії вистачає для того, щоб, подолавши притягання сусідніх молекул, залишити рідину.

Знаючи механізм випаровування, зазначимо деякі його особливості.

1. У рідині завжди є молекули, що рухаються швидко, тому *випаровування відбувається за будь-якої температури*. Чим вища температура рідини, тим більше в ній «швидких» молекул, тому *зі зростанням температури швидкість випаровування збільшується*. Оскільки рідину залишають молекули, кінетична енергія яких вища за середню, то середня кінетична енергія молекул, що залишаються, зменшується, тобто *за відсутності теплообміну процес випаровування спричиняє охолодження рідини*.

2. *Випаровування супроводжується поглинанням енергії*: енергія витрачається на виконання роботи проти сил міжмолекулярного притягання та сил зовнішнього тиску. Чим меншим є тиск на вільну поверхню рідини, тим швидше рідина випаровується.

3. *Швидкість випаровування зростає зі збільшенням площи вільної поверхні рідини* (на поверхні рідини буде більше молекул із достатньою кінетичною енергією).

4. *Різні рідини випаровуються з різною швидкістю* (спирт випаровується майже миттєво, вода — повільніше, а крапля ртуті буде випаровуватися роками, отруюючи повітря). Очевидно, що повільніше випаровуються ті рідини, молекули яких сильніше взаємодіють одна з одною.



Які особливості випаровування рідини ілюструє кожна ситуація на [рис. 31.1?](#) Наведіть власні приклади.

## 2 Яку пару називають насиченою

Швидкість випаровування залежить також від руху повітря: волосся швидше висохне, якщо його сушити феном; калюжі після дощу швидше зникають у вітряну погоду. Таку залежність легко пояснити з точки зору теплового руху молекул. Біля поверхні рідини завжди існує «хмар» молекул, які її залишили, тобто пара цієї рідини. Молекули пари безладно рухаються, зіштовхуючись одна з одною і з молекулами інших газів.

Завдяки дифузії та руху повітря деякі молекули пари віддаляються від поверхні рідини та вже ніколи в неї не повертаються. Інші молекули, навпаки, можуть опинитися так близько до поверхні рідини, що «захоплюються» силами міжмолекулярної взаємодії та повертаються в рідину (див. рис. 31.2). Якби молекули, що залишили рідину, не поверталися, то швидкість випаровування була б величезною. Наприклад, за кімнатної температури відро води випарувалося б менш ніж за годину.

Таким чином, поряд із процесом випаровування, у ході якого рідина переходить у пару, існує зворотний процес, у ході якого речовина з газоподібного стану переходить у рідкий.

Процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називають **конденсацією**.

Випаровування супроводжується поглинанням енергії, а під час конденсації, навпаки, енергія виділяється.

Закриємо кришкою посудину з деяким об'ємом рідини (рис. 31.2, б). Поверхню рідини, як і раніше, залишатимуть «швидкі» молекули, маса рідини буде зменшуватись, а концентрація молекул пари — збільшуватись. Водночас частина молекул повернеться з пари в рідину. При цьому чим більша концентрація пари, тим інтенсивнішим буде процес конденсації. Дуже швидко концентрація молекул пари над рідиною стане настільки високою, що *число молекул, які повертаються в рідину, дорівнюватиме числу молекул, які за той самий час залишають рідину*, — між процесами конденсації і випаровування встановиться **динамічна рівновага**.

Пару, яка перебуває у стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називають **насиченою парою**.

Зверніть увагу! Концентрація молекул насиченої пари — найбільша можлива концентрація молекул пари за даної температури; пару, концентрація молекул якої менша, ніж у насиченій, називають **ненасиченою парою**.

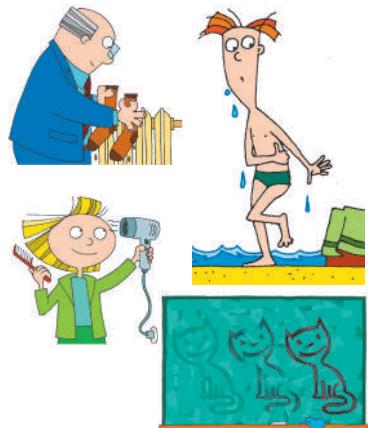


Рис. 31.1. До завдання в § 31

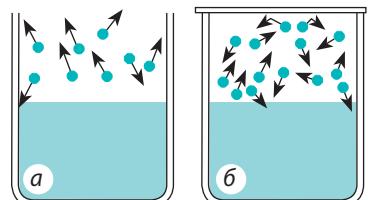


Рис. 31.2. Молекули, що залишили рідину, можуть знову повернутися у неї внаслідок теплового руху: а — пара над поверхнею рідини ненасичена; б — пара над поверхнею рідини насичена

Таблиця 1

Тиск насиченої пари за 20 °C

Речовина	Тиск, мм рт. ст.
Ртуть	0,0013
Вода	17,36
Хлороформ	160,5
Ефір	442,4
Хлор	5798 (7,63 атм)
Амоніак	6384 (8,4 атм)

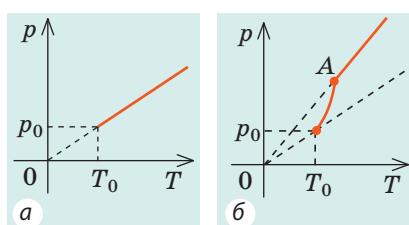


Рис. 31.3. Залежність тиску від температури: а — для ідеального газу; б — для насиченої пари (точка А відповідає повному випаровуванню рідини)

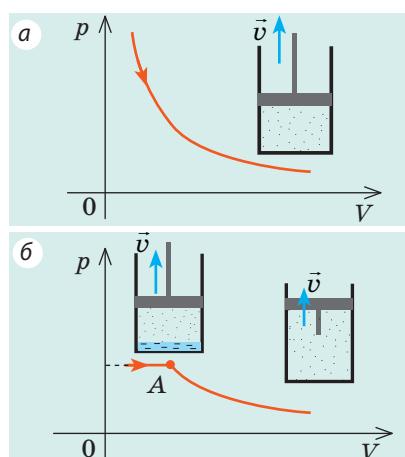


Рис. 31.4. Залежність тиску від об'єму: а — для ідеального газу; б — для насиченої пари. Точка А відповідає повному випаровуванню рідини; пара стає ненасиченою, і її тиск зменшується обернено пропорційно об'єму

## 3

## Від яких чинників залежить тиск насиченої пари

Для насиченої пари, як і для будь-якого газу, справджується рівність  $p = nkT$ .

Тобто за даної температури  $T$  тиск  $p$  насиченої пари прямо пропорційний концентрації  $n$  її молекул. Оскільки концентрація молекул насиченої пари залежить від роду рідини, то *тиск насиченої пари залежить від роду рідини* (табл. 1). Чим більшими є сили міжмолекулярної взаємодії, тим менша концентрація молекул насиченої пари, отже, тим менший її тиск.

Крім того, *тиск насиченої пари залежить від температури*. Зі збільшенням температури тиск насиченої пари зростає набагато швидше, ніж тиск ідеального газу (рис. 31.3). Річ у тім, що одочасно зі зростанням температури збільшується концентрація молекул пари. Одночасне збільшення концентрації молекул і температури спричиняє швидке зростання тиску (рис. 31.3, б).

*Зверніть увагу!* Якщо збільшення температури спричинить повне випаровування рідини, то надалі пара стане ненасиченою і її тиск лінійно залежатиме від температури.

*Тиск, створюваний насиченою парою, є найбільшим тиском, який може створити пара даної рідини за даної температури.* Якщо зменшити об'єм, який займає насичена пара, то на короткий проміжок часу концентрація молекул пари збільшиться, динамічна рівновага порушиться і число молекул, що надходять у рідину, перевищить число молекул, які залишають її поверхню. Конденсація переважатиме над випаровуванням доти, доки концентрація молекул пари не зменшиться до концентрації молекул насиченої пари, а тиск не стане дорівнювати тиску насиченої пари. Зі збільшенням об'єму, який займає насичена пара, навпаки, переважатиме процес випаровування, і в результаті знову встановиться початковий тиск. Таким чином, на відміну від ідеального газу, *тиск насиченої пари не залежить від її об'єму* (рис. 31.4).

## 4 Як і чому кипить рідина

Якщо до посудини з рідиною підвести достатню кількість теплоти, температура рідини буде збільшуватись, а дно та стінки посудини вкриються бульбашками\*. Ці бульбашки містять повітря та насичену пару, тиск яких зростатиме зі зростанням температури. *Щойно тиск газу всередині бульбашок перевищить зовнішній тиск, бульбашки почнуть збільшуватись в об'ємі* (рис. 31.5, а). Нарешті під дією архімедової виштовхувальної сили вони відірвуться від дна посудини та почнуть спливати; на місці бульбашок, що відірвалися, залишиться невелика кількість газу — «зародки» нових бульбашок (рис. 31.5, б). Поки верхні шари рідини трохи холодніші за нижні, у верхніх шарах частина водяної пари в бульбашках конденсується й бульбашки «схлопуються». Цей процес супроводжується шумом і утворенням численних дрібних бульбашок газу — рідина «кипить білим ключем».

Коли рідина повністю прогріється, бульбашки, піднімаючись, збільшуються в об'ємі, адже всередину них безперервно випаровується рідина (рис. 31.5, в). Досягнувши поверхні рідини, бульбашки лопаються, викидаючи пару в атмосферу; рідина при цьому вибуває та клекоче — *кипить* (рис. 31.5, г).

**Кипіння** — процес пароутворення, який відбувається по всьому об'єму рідини та супроводжується утворенням і збільшенням бульбашок пари.

## 5 Від яких чинників залежить температура кипіння рідини

Продовжуючи нагрівати рідину, яка вже залишила, можна помітити, що *під час кипіння температура рідини не змінюється* (рис. 31.6). Якщо збільшити кількість теплоти, яка підводиться до рідини, то збільшиться кількість

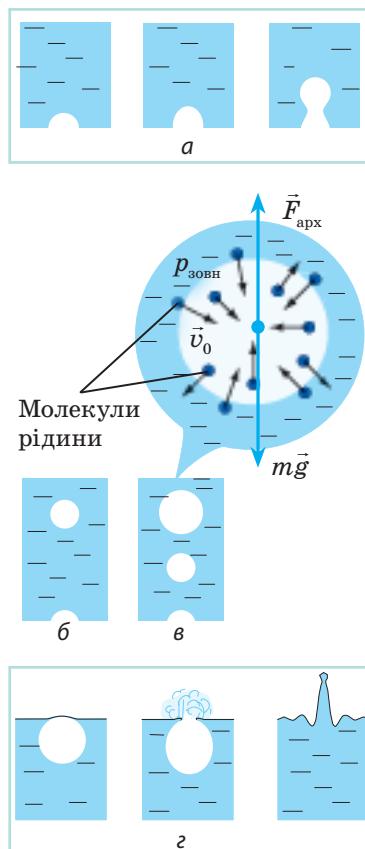


Рис. 31.5. Механізм кипіння рідини

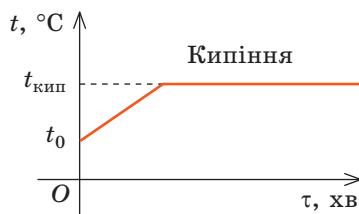
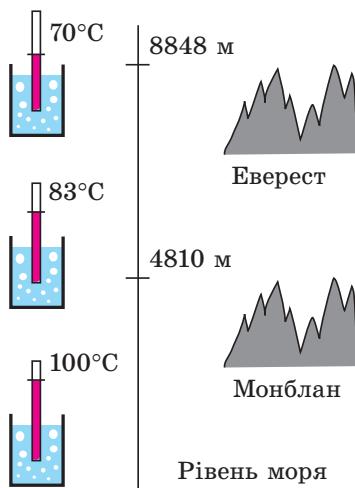


Рис. 31.6. Графік залежності температури рідини від часу

\* Насправді мікробульбашки газу наявні в рідині завжди, але помітні тільки за досить високої температури. Річ у тім, що на початку нагрівання рідина насичена газом, розчинність якого зменшується зі збільшенням температури, і «зайвий» газ виділяється всередину бульбашок.



**Рис. 31.7.** Температура кипіння води на різних висотах (і відповідно — в умовах різного тиску)



**Рис. 31.8.** Нагрівання води до високих температур здійснюється в автоклавах. За тиску понад 100 атмосфер температура кипіння води збільшується до 300 °C

**Таблиця 2**

Температура кипіння деяких речовин за нормальному атмосферного тиску

Речовина	$t_{\text{кип}}$ , °C
Водень	-253
Ефір	35
Спирт	78
Вода	100
Гліцерин	290
Ртуть	357
Свинець	1740

бульбашок, тобто зросте інтенсивність пароутворення. Таким чином, під час кипіння вся енергія, що підводиться, йде на пароутворення.

Рідина починає кипіти (бульбашки починають збільшуватися в об'ємі) тільки тоді, коли тиск газу в бульбашках ( $p_r$ ) стає трохи більшим за тиск у рідині ( $p_p$ ). У бульбашках містяться повітря та насычена пара, однак повітря в них набагато менше, ніж пари, тому тиск газу в бульбашках приблизно дорівнює тиску насыченої пари ( $p_{\text{н.п.}}$ ):  $p_r \approx p_{\text{н.п.}}$ . Тиск у рідині складається із зовнішнього тиску (тиску на поверхню рідини) ( $p_{\text{зовн.}}$ ) і гідростатичного тиску стовпа рідини ( $\rho gh$ ):  $p_p = p_{\text{зовн.}} + \rho gh$ . Якщо глибина посудини менша, ніж метр, то гідростатичним тиском рідини можна знехтувати, тому  $p_p \approx p_{\text{зовн.}}$ .

**Кипіння починається за температури, за якої тиск насыченої пари трохи перевищує зовнішній тиск.**

Чим меншим є зовнішній тиск, тим за нижчої температури кипить дана рідина (рис. 31.7). Якщо налити в колбу воду та помпою відкачувати з колби повітря, то вода закипить навіть за кімнатної температури. І навпаки, якщо необхідно підвищити температуру кипіння рідини, її нагрівають в умовах підвищеного тиску (рис. 31.8).

Оскільки тиск насыченої пари залежить від роду рідини, то за того самого зовнішнього тиску кожна речовина має свою температуру кипіння (табл. 2). Чим меншими є сили міжмолекулярного притягання в рідині, тим нижча температура її кипіння.

Температура кипіння рідини залежить від наявності в ній розчиненого газу. Якщо довго кип'ятити воду і в такий спосіб видалити з неї розчинений газ, то повторно за нормальному тиску цю воду можна буде нагріти до температури понад 100 °C. Таку воду називають *перегрітою*.



### Підбиваємо підсумки

• Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають пароутворенням. Пароутворення може відбуватися двома шляхами: випаровуванням і кипінням.

♦ Випаровування — процес пароутворення з поверхні рідини. Поряд із процесом випаровування існує процес конденсації — процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий.

♦ Кипіння — процес пароутворення, який відбувається по всьому об'єму рідини та супроводжується утворенням і збільшенням бульбашок пари. Кипіння починається за температури, за якої тиск насиченої пари в бульбашках дещо перевищує зовнішній тиск.

• Якщо за той самий час число молекул, що вилетіли з поверхні рідини, дорівнює числу молекул, які повернулися в рідину, то рідина та її пара переважають у стані динамічної рівноваги. Пару, яка переважає в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називають насиченою.

### Контрольні запитання



- Що таке пароутворення? Які способи пароутворення ви знаєте?
- Що називають випаровуванням? Якими є особливості випаровування?
- Від яких чинників залежить швидкість випаровування? Чому? Наведіть приклади.
- Що таке конденсація?
- У чому полягає стан динамічної рівноваги?
- Яку пару називають насиченою?
- Від яких чинників і чому залежить тиск насиченої пари?
- Дайте означення кипіння й опишіть цей процес.
- Від яких чинників і чому залежить температура кипіння рідини?
- Чому під час кипіння температура рідини не змінюється?

### Вправа № 31



- Чому вода у відкритій посудині трохи холодніша, ніж довколишнє повітря?
- Наведіть приклади випаровування і конденсації води в природі. Поясніть ці явища. Поясніть кругообіг води у природі.
- Тривалість варіння м'яса від моменту закипання не залежить від потужності нагрівника. Чому? Чому в сковоріці м'ясо готується значно швидше?
- Чому утворення туману затримує зниження температури повітря?
- Чи можна кипінням змусити воду замерзнути? Якщо можна, то як?
- Чи кипітиме вода в каструлі, яка плаває в каструлі з киплячою водою?
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, якими явищами буде супроводжуватися нагрівання води в космічній станції в умовах невагомості.

### Експериментальні завдання



- У шприц без голки наберіть воду приблизно до половини, щільно закрійте отвір і різко потягніть за поршень. Поясніть явища, які спостерігаються.
- Питому теплоту пароутворення рідини ( $L$ ) можна виміряти досить точно, знаючи питому теплоємність ( $c$ ) рідини та маючи лише кімнатний термометр і годинник.

Наповніть невелику каструллю водою кімнатної температури, закрійте прозорою кришкою та поставте на газову плиту (або електроплиту). Виміряйте час ( $t_1$ ) нагрівання води від кімнатної температури ( $t_0$ ) до кипіння ( $t$ ). Після того як вода закипить, відкрийте кришку і, не змінюючи потужності ( $P$ ) нагрівника, виміряйте час ( $t_2$ ) від початку кипіння до повного випаровування води.

Визначте питому теплоту пароутворення води за формулою:  $L = c(t - t_0) \frac{t_2}{t_1}$ .

Спробуйте отримати подану вище формулу самостійно. Зверніть увагу на те, що потужність нагрівника є незмінною.



## § 32. ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ТОЧКА РОСИ



Відомо, що людина приблизно на 70 % складається з води, при цьому не всі здогадуються, що значну роль у житті людини відіграє рівень вологості атмосфери. Однак ми інтуїтивно відчуваємо, що зазвичай вологе повітря корисне для здоров'я, тому прагнемо відпочивати на березі моря, річки, озера. З'ясуємо, від яких чинників залежить вологість повітря і як її можна змінити.

Таблиця 1

Тиск і густина насиченої водяної пари

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н.п.}}, \text{кПа}$	$\rho_{\text{н.п.}}, \text{г}/\text{м}^3$
0	0,61	4,8
2	0,71	5,6
4	0,81	6,4
6	0,93	7,3
8	1,07	8,3
10	1,23	9,4
12	1,40	10,7
14	1,60	12,1
16	1,81	13,6
18	2,07	15,4
20	2,33	17,3
22	2,64	19,4
24	2,99	21,8
26	3,36	24,4
28	3,79	27,2
30	4,24	30,3

### 1 Що таке вологість повітря

Повітря завжди містить певну кількість водяної пари. Уміст водяної пари в повітрі характеризується *абсолютною і відносною вологістю*.

**Абсолютна вологість**  $\rho_a$  — фізична величина, яка характеризує вміст водяної пари в повітрі та чисельно дорівнює масі водяної пари, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря:

$$\rho_a = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V}$$

**Одиниця абсолютної вологості в СІ** — **кілограм на метр кубічний**:  $[\rho_a] = 1 \text{ кг}/\text{м}^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$ .

Зазвичай абсолютну вологість подають у  $\text{г}/\text{м}^3$ . В екваторіальних широтах вона може сягати  $30 \text{ г}/\text{м}^3$ , до полюсів Землі знижується до  $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ .

**Відносна вологість**  $\varphi$  — фізична величина, яка показує, наскільки водяна пара близька до насичення, і дорівнює поданому у відсотках відношенню абсолютної вологості до густини насиченої водяної пари за даної температури:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100 \%$$

Густина насиченої водяної пари ( $\rho_{\text{н.п.}}$ ) за даної температури — величина незмінна, тому її заносять до таблиць (табл. 1) або подають у вигляді графіків (рис. 32.1). *Зверніть увагу* на два моменти.

1. За температурою і відносною вологістю легко визначити абсолютну вологість і масу водяної пари в повітрі:  $\rho_a = \rho_{\text{н.п.}} \frac{\varphi}{100 \%}$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_a \cdot V$ .

Наприклад, вимірювання показали, що в класній кімнаті об'ємом  $180 \text{ м}^3$  відносна вологість за температури  $22^\circ\text{C}$  дорівнює  $50 \%$ . Із табл. 1 знаходимо:  $\rho_{\text{н.п.}} (22^\circ\text{C}) = 19,4 \text{ г}/\text{м}^3$ . Тоді:  $\rho_a = \rho_{\text{н.п.}} \frac{\varphi}{100 \%} = 19,4 \text{ г}/\text{м}^3 \cdot 0,5 = 9,7 \text{ г}/\text{м}^3$ ;

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_a \cdot V = 9,7 \text{ г}/\text{м}^3 \cdot 180 \text{ м}^3 = 1746 \text{ г} \approx 1,7 \text{ кг.}$$

2. Густина водяної пари прямо пропорційна її парціальному тиску  $p_a$   $\left( \rho_a = \frac{p_a M}{RT} \right)$  і концентрації  $n_a$  молекул пари ( $\rho_a = m_0 n_a$ ), тому відносну воло-

гість повітря можна знайти із співвідношень:

$$\varphi = \frac{p_a}{p_{\text{н.п}}} \cdot 100\% ; \quad \varphi = \frac{n_a}{n_{\text{н.п}}} \cdot 100\% .$$

## 2 Точка роси

Аналіз графіка на рис. 32.1, а показує, що відносну вологість повітря можна збільшити, збільшивши абсолютну вологість повітря, тобто збільшивши масу водяної пари в повітрі. Якщо на кухні довго кип'ятити воду, то відносна вологість повітря може сягнути 100 % (точка С графіка), а кахлі вкриються вологою.

Відносна вологість у кухні збільшиться, якщо зменшити температуру повітря (рис. 32.1, б). За температури  $t_p$  (у точці В) пара стає насыченою (відносна вологість повітря дорівнює 100 %). Надалі навіть незначне зменшення температури приведе до того, що надлишкова водяна пара буде конденсуватися і випадати у вигляді роси або туману. Так під ранок, коли температура повітря різко меншає, на траві випадає роса, а над поверхнею водойм з'являється туман.

Температуру, за якої водяна пара, що міститься в повітрі, стає насыченою, називають **точкою роси**  $t_p$ .

Знаючи точку роси, можна визначити абсолютну і відносну вологості повітря. Наприклад, температура в кімнаті  $t = 24^\circ\text{C}$ , а стінки металевої посудини з водою, яка розташована в цій кімнаті, почали вкриватися вологою за температури води  $t = 16^\circ\text{C}$ , тобто за цієї температури пара стала насыченою ( $t = t_p$ ). Це означає, що  $\rho_a = \rho_{\text{н.п.}}(16^\circ\text{C}) = 13,6 \text{ г}/\text{м}^3$  (див. табл. 1).

Оскільки  $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100\%$ , а  $\rho_{\text{н.п.}}(24^\circ\text{C}) = 21,8 \text{ г}/\text{м}^3$ , то  $\varphi = \frac{13,6}{21,8} \cdot 100\% = 62,4\%$ .

## 3 Як вимірюти вологість повітря

Прилади для прямого вимірювання вологості повітря називають **гігрометрами**. Існує декілька видів гігрометрів, однак найуживаніші — волосяний і психрометричний. Принцип дії волосяного гігрометра (рис. 32.2) базується на властивості знежиреної волосини збільшувати свою довжину зі збільшенням вологості повітря. Узимку волосяний гігрометр є основним пристроям для вимірювання вологості повітря поза приміщенням.

Найчастіше використовують гігрометр *психрометричний* — *психрометр*. Дія цього пристроя базується на двох фактах: 1) швидкість випаровування рідини тим вища, чим нижча відносна вологість повітря; 2) рідина під час випаровування охолоджується. Психрометр складається з двох

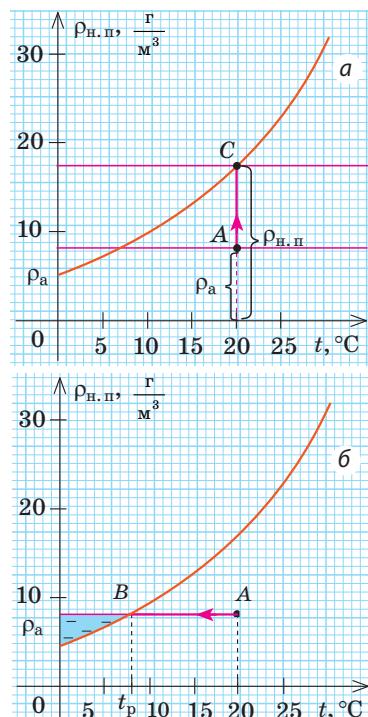
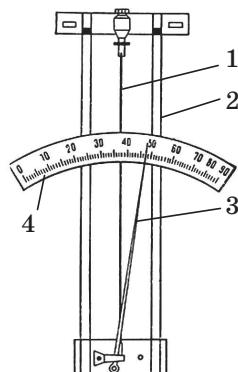
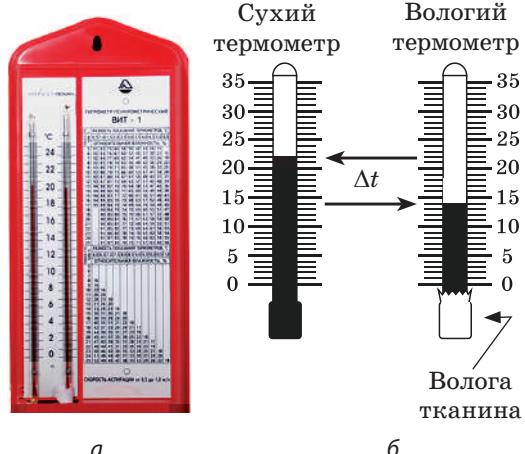


Рис. 32.1. Графіки залежності  $\rho_{\text{н.п.}}(t)$  — густини насыченої водяної пари від температури;  $\rho_a$  — абсолютна вологість



**Рис. 32.2.** Будова волосяного гігрометра: волосину 1 натягають на металеву рамку 2; зміна довжини волосини передається стрілці 3, яка переміщується вздовж шкали 4



**Рис. 32.3.** Гігрометр психрометричний:  
а — вигляд; б — будова

термометрів — *сухого*, який вимірює температуру довкілля, і *вологого* — його колба обгорнута тканиною, кінчик якої опущений у посудину з водою (рис. 32.3). Вода з тканини випаровується, і вологий термометр показує нижчу температуру, ніж сухий. Чим нижча відносна вологість повітря, тим швидше випаровується рідина і тим більша різниця показів сухого та вологого термометрів.

Відносну вологість визначають за допомогою *психрометричної таблиці* (табл. 2). Наприклад, сухий термометр показує  $15^{\circ}\text{C}$ , а вологий  $10^{\circ}\text{C}$ ; різниця температур  $\Delta t = 15^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 5^{\circ}\text{C}$ . Із табл. 2 бачимо, що  $\varphi = 52\%$ .

Якою є відносна вологість, якщо обидва термометри психрометра показують однакову температуру?

*Психрометрична таблиця*

Показ сухого термометра $t, ^{\circ}\text{C}$	Різниця показів сухого і вологого термометрів $\Delta t, ^{\circ}\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відносна вологість $\varphi, \%$											
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

## 4

## Чому потрібно стежити за вологістю повітря

Людина почувається добре за відносної вологості 50–65 %. Для її здоров'я шкідливе як надмірно сухе, так і дуже вологе повітря. Надлишкова вологість сприяє розмноженню різних хвороботворних грибків; у сухому повітрі людина швидко стомлюється, у неї дере в горлі, пересихають губи, стає сухою шкіра тощо. Якщо повітря занадто сухе, то пил, не зв'язаний вологовою, літає по всьому приміщенню, і це особливо небезпечно для людей, які потерпають від алергії. Недостатня вологість призводить до загибелі чутливих до рівня вологості домашніх рослин; тріщини на предметах із дерева, розладнані музичні інструменти — теж результат недостатньої вологості повітря.

Вологість повітря важливо враховувати у ткацькому, кондитерському та інших виробництвах; під час зберігання книжок і картин; у лікуванні багатьох хвороб тощо.



### Підбиваємо підсумки

#### Фізичні величини, що характеризують вологість повітря

Абсолютна вологість — густина водяної пари, що міститься в повітрі:

$$\rho_a = \frac{m_{H_2O}}{V}; [\rho_a] = 1 \text{ г/м}^3.$$

Відносна вологість дорівнює поданому у відсотках відношенню абсолютної вологості до густини наасичної водяної пари за даної температури:  $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{n.p.}} \cdot 100 \%$ .

- Прилади для вимірювання вологості називають гігрометрами.
- Температуру, за якої відносна вологість повітря сягає 100 %, тобто водяна пара в повітрі стає наасичною, називають точкою роси.

### Контрольні запитання



1. Наведіть характеристики абсолютної та відносної вологостей повітря як фізичних величин.
2. Як можна збільшити відносну вологість?
3. Які пристлади для визначення вологості повітря ви знаєте? Опишіть будову і принцип дії кожного з них.
4. Що називають точкою роси? Як, знаючи точку роси, визначити абсолютну вологість? відносну вологість?

### Вправа № 32



1. Чому на холодній водопровідній трубі утворюються краплі води?
2. Чому людина легше переносить спеку, якщо повітря сухе?
3. Чому взимку, коли працює опалення, повітря в кімнаті досить сухе? Що потрібно робити, щоб підтримувати оптимальну вологість повітря?
4. На стіні приміщення, внутрішній об'єм якого 100 м<sup>3</sup>, висить психрометр (див. рис. 32.3). Визначте відносну й абсолютну вологості повітря в приміщенні. Якою є маса водяної пари в повітрі приміщення? Яку масу води потрібно випарувати, щоб збільшити вологість до 50%?
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, коли і чому слід збільшувати (зменшувати) вологість повітря.



## Експериментальне завдання

«Гігрометр». Скориставшись металевою банкою з водою, спиртовим термометром і дрібними грудочками льоду, визначте вологість повітря у вашій кімнаті.

1. Виміряйте температуру в кімнаті.
2. Занурте термометр у воду і поступово охолоджуйте її, додаючи грудочки льоду. Стежте за поверхнею банки: щойно вона помутніє (з'являться дуже маленькі крапельки води, тобто температура поверхні банки досягне точки роси), виміряйте температуру води ( $t_{\text{роси}}$ ).
3. Скориставшись табл. 1 у § 32, визначте абсолютну і відносну вологості повітря в кімнаті:  $\rho_a = \rho_{\text{н.п.}} (t_{\text{роси}})$ ;  
 $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100\%$ .



## § 33. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ РІДИНИ. ЗМОЧУВАННЯ. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА



Деякі види павуків можуть пересуватися по поверхні води не провалюючись, наче ця поверхня вкрита невидимою тонкою плівкою. Те саме враження виникає, якщо спостерігати за витіканням води з маленького отвору, — вода тече не тоненьким струменем, а утворює краплі. Паперова серветка вбирає воду, ледь торкнувшись її поверхні. Яка ж сила є причиною всіх цих явищ?

### 1

### Які особливості має поверхневий шар рідини

На вільній поверхні рідини молекули перебувають в особливих умовах, які відрізняються від умов, у яких перебувають молекули всередині рідини. Розглянемо дві молекули — *A* і *B* (рис. 33.1): молекула *A* перебуває всередині рідини, а молекула *B* — на її поверхні. Молекула *A* оточена іншими молекулами рідини рівномірно, тому сили, що діють на молекулу *A* з боку молекул, які потрапляють у сферу міжмолекулярної взаємодії, скомпенсовані, тобто їх рівнодійна дорівнює нулю.

Молекула *B* з одного боку оточена молекулами рідини, а з другого боку — молекулами газу. Оскільки з рідини на неї діє набагато більше молекул, ніж із газу, то рівнодійна  $\vec{F}$  міжмолекулярних сил напрямлена вглиб рідини. Щоб молекула з глибини рідини потрапила в поверхневий шар, потрібно виконати роботу проти нескомпенсованих міжмолекулярних сил. Це означає, що молекули поверхневого шару рідини (порівняно з молекулами всередині рідини) мають надлишкову потенціальну енергію. Ця надлишкова енергія є складником внутрішньої енергії рідини і називається *поверхневою енергією* ( $W_{\text{пов}}$ ).

Очевидно, що чим більшою є площа  $S$  поверхні рідини, тим більша поверхнева енергія:  $W_{\text{пов}} = \sigma S$ , де  $\sigma$  (сигма) — коефіцієнт пропорційності, який називають *поверхневим натягом рідини*.

**Поверхневий натяг рідини** — фізична величина, яка характеризує дану рідину і дорівнює відношенню поверхневої енергії до площини поверхні рідини:

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$$

Одиниця поверхневого натягу в СІ — **ньютон на метр**:  $[\sigma] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$ .

Поверхневий натяг рідини визначається силами міжмолекулярної взаємодії, тому він залежить:

- 1) *від природи рідини*: у летких рідин (ефір, спирт, бензин) поверхневий натяг менший, ніж у нелетких (ртуть, рідкі метали);
- 2) *від температури рідини*: чим вища температура рідини, тим меншим є поверхневий натяг рідини;
- 3) *від наявності в складі рідини поверхнево активних речовин*; їх наявність значно зменшує поверхневий натяг рідини;

- 4) *від властивостей газу, з яким рідина межує*. У таблицях зазвичай наводять значення поверхневого натягу на межі рідини і повітря за певної температури (табл. 1).

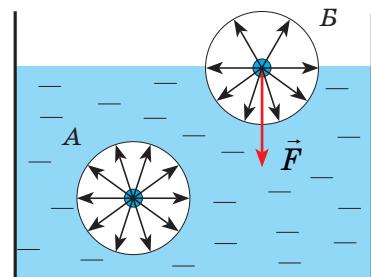


Рис. 33.1. До введення поняття поверхневого натягу рідини

Таблиця 1

Поверхневий натяг  $\sigma$  деяких рідин

Рідина	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Вода (чиста)	20	0,0728
Розчин мила	20	0,040
Спирт	20	0,0228
Ефір	25	0,0169
Ртуть	20	0,4650
Золото	1130	1,102
Водень	-253	0,0021
Гелій	-269	0,00012

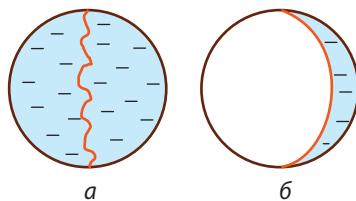
## 2

### Сила поверхневого натягу

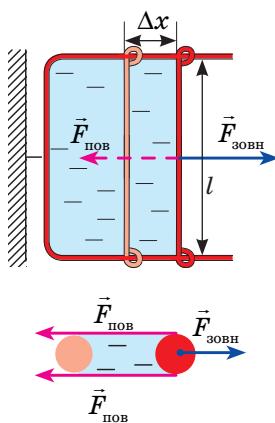
Оскільки поверхневий шар рідини має надлишкову потенціальну енергію ( $W_{\text{пов}} = \sigma S$ ), а будь-яка система прагне до мінімуму потенціальної енергії, то вільна поверхня рідини прагне зменшити свою площину (скротитися). Тобто вздовж поверхні рідини діють сили, що намагаються стягнути цю поверхню. Ці сили називають *силами поверхневого натягу*.

Наявність сил поверхневого натягу робить поверхню рідини схожою на розтягнуту гумову плівку, однак пружні сили в гумовій плівці залежать від площини її поверхні (тобто від того, наскільки плівка деформована), *а поверхня рідини завжди «натягнута» однаково, тобто сили поверхневого натягу не залежать від площини поверхні рідини*.

Існування сил поверхневого натягу можна експериментально довести за допомогою такого досліду. Якщо дротяний каркас із прив'язаною до



**Рис. 33.2.** Дослід, що демонструє наявність сил поверхневого натягу



**Рис. 33.3.** На поперечину діють три сили: зовнішня сила  $\vec{F}_{\text{зовн}}$  і дві сили поверхневого натягу ( $\vec{F}_{\text{пов}}$ ), що діють уздовж кожної з двох поверхонь пілівки:  
 $F_{\text{зовн}} = 2F_{\text{пов}}$



**Рис. 33.4.** Монетка утримується на поверхні води завдяки силі поверхневого натягу. (Щоб провести такий дослід, монетку потрібно потерти між пальців і обережно опустити на поверхню води.)

нього ниткою занурити в мильний розчин, каркас затягнеться мильною плівкою, а нитка набере довільної форми (рис. 33.2, а). Якщо ж обережно проткнути голкою мильну плівку з одного боку від нитки, сила поверхневого натягу мильного розчину, яка діє з іншого боку нитки, натягне нитку (рис. 33.2, б).

Опустимо в мильний розчин дротяну рамку, одна зі сторін якої рухома. На рамці утвориться мильна плівка (рис. 33.3). Будемо розтягувати цю плівку, діючи на поперечину (рухому сторону рамки) з певною силою  $F_{\text{зовн}}$ . Якщо під дією цієї сили поперечина переміститься на  $\Delta x$ , то зовнішні сили виконають роботу:

$$A = F_{\text{зовн}} \Delta x = 2F_{\text{пов}} \Delta x.$$

За рахунок виконання цієї роботи площа обох поверхонь плівки збільшується, а отже, збільшується й поверхнева енергія:

$$A = \Delta W_{\text{пов}} = \sigma \Delta S = \sigma \cdot 2l \Delta x,$$

де  $\Delta S = 2l \Delta x$  — збільшення площи двох поверхонь мильної плівки. Прирівнявши праві частини одержаних рівностей, маємо:  $2F_{\text{пов}} \Delta x = \sigma \cdot 2l \Delta x$ , або:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot l.$$

Таким чином, *поверхневий натяг  $\sigma$  чисельно дорівнює силі поверхневого натягу  $F_{\text{пов}}$ , яка діє на одиницю довжини  $l$  лінії, що обмежує поверхню*:

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$

З одним із методів визначення поверхневого натягу рідини (методом крапель) ви ознайомитеся, виконуючи лабораторну роботу № 7.

### 3 Де виявляється поверхневий натяг

У повсякденному житті ви постійно зустрічаетесь з проявами сил поверхневого натягу. Так, завдяки йому на поверхні води утримуються легкі предмети (рис. 33.4) і деякі комахи (див. [рисунок](#) на початку § 33). Коли ви купаетесь і пірнаєте у воду з головою, ваше волосся розходитья в усі боки, але щойно виринете з води, як волосся злипається, бо в цьому

випадку площа вільної поверхні води набагато менша, ніж у разі окремого розташування кожного пасма. З цієї ж причини можна побудувати різні фігури з вологого піску: вода, обволікаючи піщанки, притискає їх одну до одної.

Прагненням рідини зменшити площину поверхні пояснюється й той факт, що в умовах невагомості вода набуває форми кулі, — за даного об'єму кулястій формі відповідає найменша площа поверхні. Форми кулі набувають і тонкі мильні плівки (мильні бульбашки). Поверхневим натягом пояснюється утворення піни: бульбашка газу, досягнувши поверхні рідини, утворює над собою тонкий шар рідини; якщо бульбашка мала, то архімедової сили недостатньо, щоб розірвати подвійний поверхневий шар, і бульбашка застригає поблизу поверхні. Завдяки поверхневому натягу рідина не виливається з маленького отвору тонесенським струменем, а капає (рис. 33.5), дощ не проливається через тканину парасолі або намету тощо.



Наведіть інші приклади прояву поверхневого натягу рідин.

4

#### Чому одні рідини збираються в краплі, а інші розтікаються

Наявність сил поверхневого натягу виявляється у сферичній формі дрібних крапельок роси, у краплях води, що розбігаються по розпечений плиті, у крапельках ртуті на поверхні скла. Однак у випадку зіткнення з твердим тілом сферична форма краплі здебільшого не зберігається. Форма вільної поверхні рідини залежить від сил взаємодії молекул рідини з молекулами твердого тіла.

Якщо сили взаємодії між молекулами рідини більші, ніж сили взаємодії між молекулами рідини та твердого тіла, рідина не змочує поверхню твердого тіла (рис. 33.6). Наприклад, ртуть не змочує скло, а вода не змочує вкриту сажею поверхню.

Якщо ж крапельку ртуті помістити на цинкову пластинку, то крапелька прагнутиме розтектися по поверхні пластинки; так само поводиться й крапелька води на склі (рис. 33.7). Якщо сили взаємодії між молекулами рідини менші від сил взаємодії між молекулами рідини і твердого тіла, рідина змочує поверхню твердого тіла.

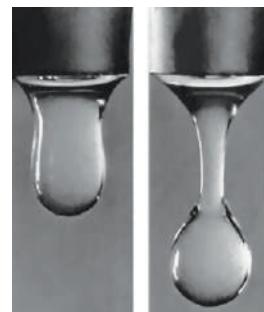


Рис. 33.5. Крапля утримується біля невеликого отвору доти, доки сила поверхневого натягу зрівноважує силу тяжіння

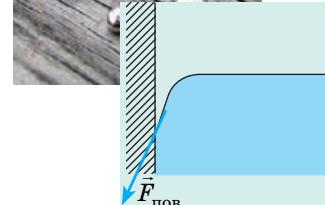


Рис. 33.6. Крапля незмочувальної рідини набуває форми, близької до сферичної, а поверхня рідини поблизу стінки посудини є опуклою

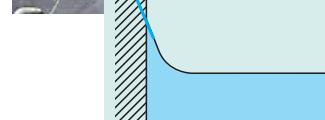
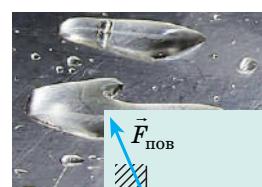


Рис. 33.7. Крапля змочувальної рідини прагне розтектися по поверхні твердого тіла, а поблизу стінки посудини поверхня рідини набуває ввігнутої форми



**Рис. 33.8.** Капілярні явища: *а* — змочувальна рідина піднімається в капілярі; *б* — незмочувальна рідина опускається в капілярі

### 5 Чому рідина піднімається в капілярах

У природі часто зустрічаються тіла, пронизані численними дрібними **капілярами** (від латин. *capillaris* — волосяний) — вузькими каналами довільної форми. Таку структуру мають папір, дерево, ґрунт, багато тканин і будівельних матеріалів.

У циліндричних капілярах скривлена поверхня рідини являє собою частину сфери, яку називають **меніском**. У змочувальній рідині утворюється **ввігнутий меніск** (рис. 33.8, *а*), а в незмочувальній — **опуклий меніск** (рис. 33.8, *б*). Поверхня рідини прагне до мінімуму потенціальної енергії, а викривлена поверхня рідини прагне вирівнятись і під нею виникає **надлишковий (від'ємний або додатний) тиск** — **тиск Лапласа** ( $p_{\text{надл}}$ ).

Під увігнутою поверхнею (рідина змочує капіляр) загальний тиск менший від тиску на поверхні рідини й рідина втягується в капіляр, піднімаючись на досить велику висоту. Так піднімається волога та поживні речовини в стеблах рослин, гас у ґноті, волога у ґрунтових капілярах. Унаслідок капілярного тиску серветки або тканина вбирають воду, штани в дощову погоду сильно намокають знизу тощо.

Під опуклою поверхнею (рідина не змочує капіляр) тиск більший за зовнішній тиск і рідина в капілярі опускається.

Чим меншим є радіус капіляра, тим більша висота підняття (або опускання) рідини (див. нижче приклад розв'язування задачі).

### 6 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Капілярну трубку радіусом  $r$  одним кінцем опустили в рідину, що змочує внутрішню поверхню капіляра. На яку висоту підніметься рідина в капілярі, якщо густина рідини  $\rho$ , а її поверхневий натяг  $\sigma$ ? Чому дорівнює тиск Лапласа під увігнутою поверхнею капіляра? Змочування вважайте повним.

**Дано:**

$r$

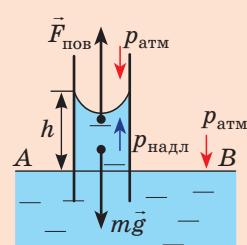
$\rho$

$g$

$h — ?$

$p_{\text{надл}} — ?$

**Аналіз фізичної проблеми.** На рідину в капілярі діють сила тяжіння та сила поверхневого натягу ( $\vec{F}_{\text{пов}}$ ) (див. рисунок). У разі повного змочування  $\vec{F}_{\text{пов}}$  напрямлена вертикально вгору (по дотичній до поверхні меніска). Підняття рідини в капілярі триватиме доти, доки сила тяжіння піднятого стовпа рідини не зрівноважить силу поверхневого натягу:  $mg = F_{\text{пов}}$  (\*), де  $m$  — маса рідини.



**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Оскільки  $m = \rho V$ , а об'єм циліндра  $V = \pi r^2 h$ , то  $m = \rho \pi r^2 h$ .

$F_{\text{пов}} = \sigma l$ , де  $l = 2\pi r$  (довжина кола), отже,  $F_{\text{пов}} = \sigma 2\pi r$ .

Підставимо вирази для  $m$  і  $F_{\text{пов}}$  у рівність (\*):  $\rho \pi r^2 h g = \sigma 2\pi r$ , звідки  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

Для визначення тиску Лапласа  $p_{\text{надл}}$  під поверхнею меніска скористаємося законом Паскаля: в однорідній нерухомій рідині тиск на одному рівні (у нас — на рівні  $AB$ ) — одинаковий, тобто:

$$p_{\text{атм}} + p_{\text{гідр}} + p_{\text{надл}} = p_{\text{атм}} \Rightarrow p_{\text{надл}} = -p_{\text{гідр}} = -\rho g h = -\rho g \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = -\frac{2\sigma}{r} = -\frac{2\sigma}{R},$$

де  $R$  — радіус кривизни меніска (при повному змочуванні  $r = R$ ).

*Відповідь: (Ці висновки слід запам'ятати!)*

♦ *Висота підняття рідини в капілярі прямо пропорційна поверхневому натягу рідини та обернено пропорційна густині рідини й радіусу капіляра:  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .*

♦ *Тиск Лапласа (надлишковий тиск) під сферичною поверхнею рідини прямо пропорційний поверхневому натягу рідини й обернено пропорційний радіусу кривизни меніска:  $p_{\text{надл}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$ .*

**Підбиваємо підсумки**

- Молекули поверхневого шару рідини мають надлишкову потенціальну енергію порівняно з молекулами, що перебувають усередині рідини; цю енергію називають поверхневою енергією.
- Фізична величина, яка характеризує рідину і дорівнює відношенню поверхневої енергії до площини поверхні рідини, називається поверхневим натягом рідини:  $\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$ . Поверхневий натяг також дорівнює силі, яка діє на одиницю довжини лінії, що обмежує поверхню рідини:  $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$ . Одиниця поверхневого натягу в СІ — ньютон на метр (Н/м).
- Під викривленою поверхнею рідини виникає надлишковий (від'ємний або додатний) тиск, який прямо пропорційний поверхневому натягу рідини та обернено пропорційний радіусу кривизни меніска:  $p_{\text{надл}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$ . Завдяки цьому тиску рідина піднімається в капілярах, які змочує, і опускається в капілярах, які не змочує. Висота підняття (опускання) рідини в капілярі:  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

**Контрольні запитання**

1. У чому особливості стану молекули поверхневого шару рідини? 2. Що називають поверхневою енергією? 3. Чому рідина прагне набути форми кулі?
4. Дайте два означення поверхневого натягу рідини. 5. Від яких чинників і чому залежить поверхневий натяг рідини? від яких чинників не залежить?
6. За яких умов рідина змочує поверхню твердого тіла? не змочує? 7. У чому причина тиску Лапласа? Чому він дорівнює? 8. Від яких чинників залежить висота підняття рідини в капілярі? 9. Наведіть приклади капілярних явищ.



### Вправа № 33

- Чому волоски пензлика злипаються після того, як його виймають із води?
- У капілярі вода піднімається на 0,5 м. Визначте середній діаметр капіляра.
- Визначте надлишковий тиск усередині мильної бульбашки радіуса 5 см. (Слід пам'ятати, що в мильній бульбашці дві поверхні.)
- Тонке алюмінієве кільце радіуса 7,8 см і масою 7 г дотикається до мильного розчину. Щоб відірвати кільце від поверхні розчину, потрібно прикласти зусилля 0,11 Н. Визначте поверхневий натяг мильного розчину.
- Яка кількість енергії вивільняється під час злиття дрібних крапель рутуті радіуса 0,2 мм в одну велику краплю радіуса 2 мм? Площа кулі дорівнює  $4\pi r^2$ , об'єм кулі —  $\frac{4}{3}\pi r^3$ .
- Як ви гадаєте, де на практиці потрібно збільшувати змочування? У яких випадках його варто зменшувати? Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, які речовини використовують для збільшення змочування. Які способи застосовують для зменшення змочування?



### Експериментальні завдання

Покладіть сірник на поверхню води. З одного боку сірника обережно додайте краплю мильного розчину. Поясніть подальшу поведінку сірника. Визначте модуль і напрямок сили, яка діятиме на сірник.

## § 34. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. АНІЗОТРОПІЯ КРИСТАЛІВ. РІДКІ КРИСТАЛИ



Більшість речовин на поверхні Землі перебувають у твердому стані. Парта, за якою ви працюєте, олівець, що тримаєте в руці, кістки вашої руки тощо — це все тверді тіла. Розмову про те, як розташовані молекули у твердих тілах і які властивості мають тверді тіла внаслідок такого розташування, продовжимо в цьому параграфі.

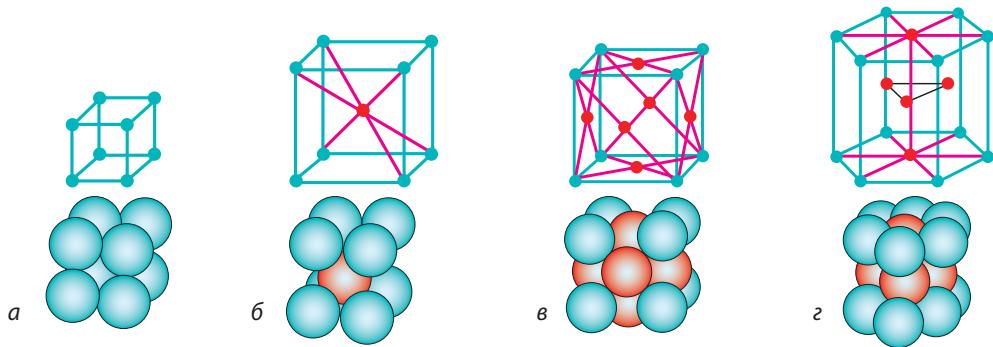
### 1

#### Аморфні — тож не мають форми? Чи так це?

Ви вже знаєте, що за структурою аморфні тіла дуже близькі до рідин. Молекули, атоми, йони аморфних тіл взагалі розташовані хаотично, і тільки всередині невеликих локальних груп, які містять усього кілька частинок, вони розташовані в певному порядку (*ближній порядок*). Фізичні властивості аморфних тіл (теплопровідність, електропровідність, міцність, оптичні властивості тощо) однакові в усіх напрямках — *аморфні тіла ізотропні*.

**Ізотропія** (від грец. *isos* — рівний і *tropos* — напрямок, властивість) — незалежність фізичних властивостей від напрямку, обраного в тілі.

Прикладами аморфних тіл можуть бути скло, різні затверділі смоли (янтар), пластики тощо. Аморфні тіла певний час зберігають свою форму, однак унаслідок тривалого впливу вони течуть. Якщо аморфне тіло нагрівати, то воно м'якшає поступово і його перехід у рідкий стан займає значний інтервал температур.



**Рис. 34.1.** Деякі види кристалічних ґраток: а — проста кубічна; б — об'ємноцентрована кубічна; в — гранецентрована кубічна

## 2

### Що таке поліморфізм

У кристалічних тілах частинки речовини (атоми, молекули, іони) розташовані в чітко визначеному порядку. Якщо з'єднати центри положень рівноваги частинок кристалічного тіла, то вийде правильна просторова ґратка, яку називають *кристалічною*. Доведено, що існує 230 типів кристалічних ґраток.

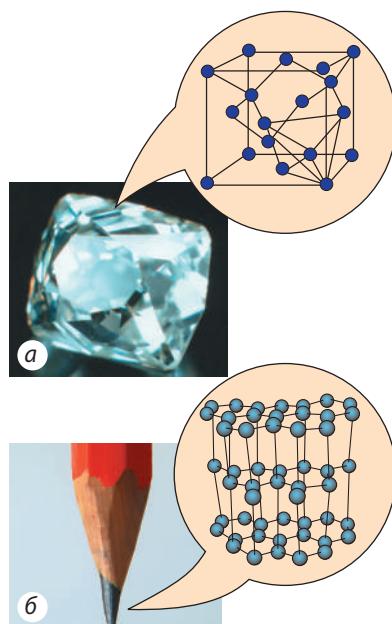
Наприклад, у кристалі полонію іони Полонію розташовані у вершинах куба, утворюючи *просту кубічну ґратку* (рис. 34.1, а).

Іони чистого Феруму за кімнатної температури теж розміщені у вершинах куба, крім того, один іон розташований у центрі куба — це *об'ємноцентрована кубічна ґратка* (рис. 34.1, б).

Якщо нагріти залізо до 906 °С, то розташування іонів Феруму раптом зміниться — ґратка перебудується. Центральні іони змістяться, а в середині кожної грані куба з'явиться додатковий іон, — це *гранецентрована кубічна ґратка* (рис. 34.1, в). У такій ґратці частинки впаковані щільніше, ніж в об'ємноцентрованій кубічній. Щільне пакування спостерігається також у *гексагональній кристалічній ґратці* (рис. 34.1, г).

*Зверніть увагу!* Частинки в кристалах щільно впаковані, відстані між їх центрами приблизно дорівнюють розміру частинок (електронні хмари частинок торкаються одна одної), а от у зображені кристалічних ґраток часто показують тільки положення рівноваги частинок.

Багато кристалічних речовин мають одинаковий хімічний склад, однак через різну структуру кристалічних ґраток відрізняються своїми фізичними властивостями (рис. 34.2). Таке явище називають *поліморфізмом*, а перехід із однієї кристалічної структури в іншу — *поліморфним переходом*.



**Рис. 34.2.** Різні кристалічні стани вуглецю: а — алмаз; б — графіт

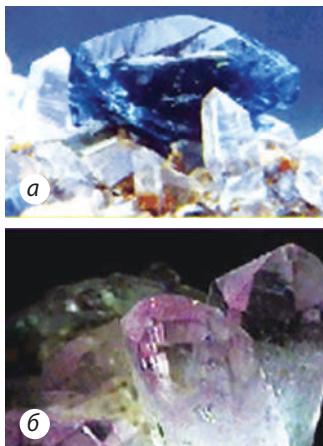


Рис. 34.3. Природні кристали: а — лазурит; б — кварц

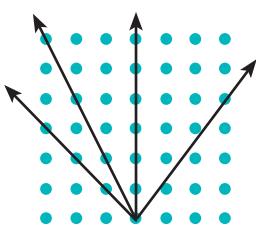


Рис. 34.4. Унаслідок упорядкованої будови кристала відстані між його частинками в різних напрямках різні

Від напрямку, обраного в кристалі, залежать його тепlopровідність, електропровідність, заломлення, прозорість, лінійне розширення та багато інших фізичних властивостей. Анізотропія кристалів зумовлена їх кристалічними ґратками: в різних напрямках відстані між частинками, що утворюють кристалічну ґратку, різні (рис. 34.4).

У якому напрямку механічна міцність графіту є найменшою (див. рис. 34.2, б)?

Великі монокристали рідко зустрічаються в природі. Найчастіше кристалічні тверді тіла, в тому числі отримані штучно, є **полікристалами**.

**Полікристали** — тверді тіла, які складаються з багатьох хаотично орієнтованих маленьких кристаликів, що зрослися між собою (кристалітів).

На відміну від монокристалів **полікристалічні тіла ізотропні**, тобто їх властивості однакові в усіх напрямках. Полікристалічну будову твердого тіла можна виявити за допомогою мікроскопа, а іноді її видно й неозброєним оком (чавун). Більшість металів, які використовує людина, є полікристалами.

Наприклад, у виробництві штучних алмазів викристовують поліморфний перехід графіту в алмаз. Цей перехід відбувається за тисків 60 тис. — 100 тис. атмосфер і за температур 1800–2300 °C. І навпаки: у результаті нагрівання у вакуумі до температури близько 1500 °C алмаз перетворюється на графіт.

### 3

### Чому монокристали є анізотропними

Кристалічні тіла можуть бути **монокристалами і полікристалами**.

**Монокристал** — тверде тіло, частинки якого утворюють єдину кристалічну ґратку.

Упорядковане розташування частинок у монокристалі є причиною того, що монокристали мають плоскі грані та незмінні кути між гранями (рис. 34.3); **фізичні властивості монокристалів залежать від обраного в них напрямку**.

Залежність фізичних властивостей кристала від обраного в ньому напрямку називається **анізотропією** (від грец. *anisos* — нерівний і *tropos* — напрямок, властивість).

Так, механічна міцність багатьох кристалів різна в різних напрямках: шматок слюди легко розшаровується на тонкі пластиинки в одному напрямку, але його набагато складніше розламати перпендикулярно до пластиинок.

## 4

## Рідкі кристали

**Рідкий кристал** — стан речовини, який поєднує плинність рідини й анізотропію кристалів.

У *рідині* частинки в цілому розташовані хаотично та можуть вільно обертатись і переміщуватись у будь-яких напрямках; у *кристалічному твердому тілі* існує тривимірний далекий порядок і частинки можуть лише коливатися біля положень рівноваги. У *рідкому кристалі* є певний ступінь упорядкованості в розташуванні молекул (рис. 34.5), але й допускається деяка свобода їх переміщення. Найчастіше рідкокристалічний стан спостерігається в органічних речовин, молекули яких мають видовжену або дискооподібну форму.

Залежність оптичних властивостей рідких кристалів від температури та електричного поля забезпечила їх широке застосування в дисплеях годинників і калькуляторів, у персональних комп’ютерах, плоских телевізійних екранах; їх використовують у медицині (наприклад, як індикатори температури) тощо. Так, кут повороту осей молекул у кожному шарі холестеричного рідкого кристала залежить від температури, а від кута повороту залежить забарвлення кристала, тому якщо тонку полімерну плівку з мікропорожнинами, заповненими холестериком, накласти на тіло, то вийде кольорове відображення розподілу температури.

## Контрольні запитання

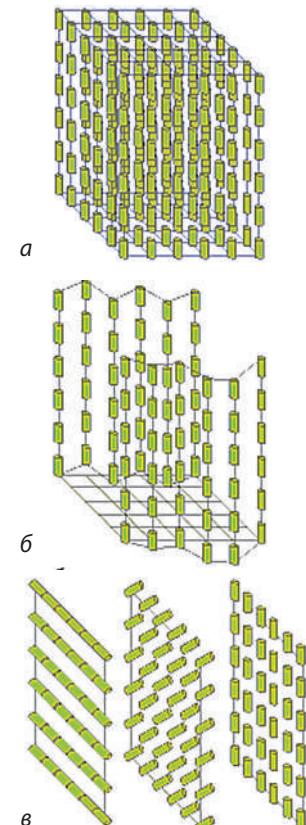


- Чому аморфні тіла ізотропні?
- Які властивості є характерними для монокристалів?
- Що таке анізотропія? Наведіть приклади прояву анізотропії кристалів.
- Чи всі кристалічні тіла анізотропні? Наведіть приклади, які підтверджують вашу відповідь.
- Що таке поліморфізм? Наведіть приклади.
- У чому особливості будови і властивостей рідких кристалів? Де їх застосовують?

## Вправа № 34



- Кварцова кулька після нагрівання набула форми еліпсоїда. Чому?
- Кожну з двох тонких пластин, виготовлених із різних речовин, зверху покрили шаром воску. Знизу до кожної пластини притиснули вістря розпеченої голки (рис. 1, а) — на невеликій ділянці навколо вістря віск розтанув. За формуою ділянок (рис. 1, б, в) визначте, яка пластина виготовлена з полікристалічної речовини, а яка є монокристалом. Відповідь обґрунтуйте.



**Рис. 34.5.** Деякі типи рідких кристалів: а — смектичні (молекули орієнтовані паралельно одній і утворюють тонкі шари); б — нематичні (нитковидні молекули напрямлені паралельно одній, але можуть ковзати вгору та вниз); в — холестеричні (плоскі довгі молекули зібрані в шари, повернуті один відносно одного)

3. У сучасних смартфонах використовують два типи LCD (liquid crystal display) — рідкокристалічних дисплеїв (рис. 2). Смартфони з дисплеєм TFT LCD коштують менше, проте споживачі часто віддають перевагу смартфонам із дисплеєм IPS LCD. Скориставшись додатковими джерелами інформації, спробуйте пояснити, чому.

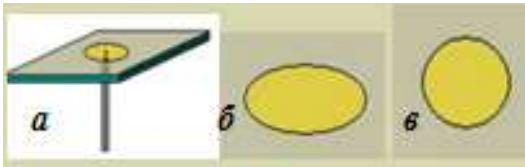


Рис. 1



Рис. 2

4. «Полімери — матеріали майбутнього». Підготуйте коротке повідомлення про структуру полімерів та їх застосування в одній із галузей: промисловість, сільське господарство, медицина, побут тощо. Які природні матеріали зберігають, замінюючи їх полімерами?

## Фізика і техніка в Україні



**Інститут монокристалів НАН України** (Харків) має більш ніж півстолітню історію і є одним із визнаних лідерів у таких галузях:

- ◆ фундаментальні дослідження структури, фізичних і фізико-хімічних властивостей кристалів, тонких плівок, наноматеріалів;
- ◆ розроблення й удосконалення високотехнологічного устаткування та методів виробництва кристалів різного функціонального призначення.

Дослідження та розробки інституту широко затребувані у світі — про це свідчать його численні наукові та виробничі зв'язки, участь у великих міжнародних наукових експериментах, розширення зовнішньоекономічної діяльності на основі створених високих технологій. Характерна риса інституту — закінчений цикл наукових розробок: від ідей і досліджень до створення матеріалів та їх впровадження у виробництво.

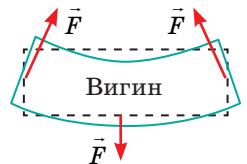
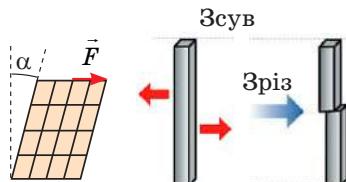
## § 35. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

- Потрібна порада! Прогнулася балка міжповерхового перекриття...
- Вам, здається, не поради та підказки треба шукати, а нормального техніка-будівельника, і терміново... (Із розмови в Інтернеті)
- Дівчина постраждала, зірвавшись зі джгута банджі-джампінгу. Робота атракціону призупинена. (Із новин)
- Зрозуміло, що ми можемо мешкати в будинку, не маючи уяви про матеріали, з яких він побудований; можемо стрибати з моста або літака, не уявляючи, якою є міцність джгута або строп парашута. Але неможливо побудувати надійний будинок, створити безпечний атракціон без знань механічних властивостей використовуваних матеріалів. Про деякі з таких властивостей ітиметься в цьому параграфі.

## 1 Які існують види деформації

Нагадаємо: деформація — це зміна форми та (або) розмірів тіла. Якщо після припинення дії зовнішніх сил тіло повністю відновило свої форму і розміри, то воно зазнало *пружної деформації*; якщо форма і розміри не відновилися, тіло зазнало *пластичної деформації*.

Коли тіло деформується, окрім його частини зміщаються одна відносно одної. За характером зміщення частин розрізняють *деформації розтягнення (стиснення), вигину, зсуву, кручення*:

Види деформацій	
	Сили, прикладені до тіла, намагаються видовжити або укоротити тіло, внаслідок чого відстань між шарами молекул збільшується ( <i>деформація розтягнення</i> ) або зменшується ( <i>деформація стиснення</i> ).
	Сили, прикладені до тіла, намагаються викривити (вигнути) тіло. <i>Деформація вигину</i> — це водночас деформація розтягнення і деформація стиснення: опукла частина тіла зазнає деформації розтягнення (відстань між шарами молекул збільшується); увігнута частина — деформації стиснення (відстань між шарами молекул зменшується).
	Сили, прикладені до тіла, напрямлені протилежно одна одній і зсовують шари тіла один відносно одного. <i>Деформації зсуву</i> зазнають, наприклад, цвяхи та болти, які скріплюють частини різних конструкцій; тканина, яку розрізають ножицями. Зсув на великі кути $\alpha$ може привести до руйнування тіла — <i>зрізу</i> .
	Сили, прикладені до тіла, створюють обертальний момент відносно повзводжної осі тіла. Зсув шарів молекул відбувається неоднаково — кожний шар повертається на певний кут відносно іншого шару. <i>Деформації кручення</i> зазнають вали всіх машин, гвинти, ключі, викрутки тощо.



Яких деформацій зазнають тіла на рис. 35.1? Обґрунтуйте свою відповідь.



Рис. 35.1. До запитання в § 35



### Чи зміниться міцність



Коли стрижень зазнає деформації вигину, його середня частина (частина біля осі) не зазнає ані розтягнення, ані стиснення. Тобто, якщо її видалити, то міцність конструкції на вигин майже не зміниться.

Тому, наприклад, раму велосипеда, яка переважно зазнає деформації вигину, виготовляють із тонких порожніх металевих трубок, завдяки чому велосипед є досить легким і залишається при цьому міцним.

Про подібну міцність «конструкцій», легкість та економію «матеріалу» погодбала й природа — вона наділила людину і тварин трубчастими кістками кінцівок, а злаки — трубчастими стеблами.



У випадку малих пружних деформацій розтягнення і стиснення механічна напруга  $\sigma$  прямо пропорційна відносному видовженню  $\varepsilon$ :

$$\sigma = E |\varepsilon|^{**}$$

### 2 Що таке механічна напруга

Коли тіло деформується, його стан змінюється: у будь-якому перерізі тіла виникають сили пружності, що перешкоджають руйнуванню; чим більше деформоване тіло, тим більшими є сили пружності. Стан деформованого тіла характеризується **механічною напругою**.

**Механічна напруга**  $\sigma$  — фізична величина, яка характеризує деформоване тіло і дорівнює відношенню модуля сили пружності  $F_{\text{пруж}}$  до площини  $S$  поперечного перерізу тіла\*:

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$$

Одиниця механічної напруги в СІ — паскаль:

$$[\sigma] = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 \quad (1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2).$$

Установлено, що механічна напруга залежить від **відносного видовження** тіла.

**Відносне видовження**  $\varepsilon$  тіла — фізична величина, яка дорівнює відношенню видовження  $\Delta l$  до початкової довжини  $l_0$  тіла:

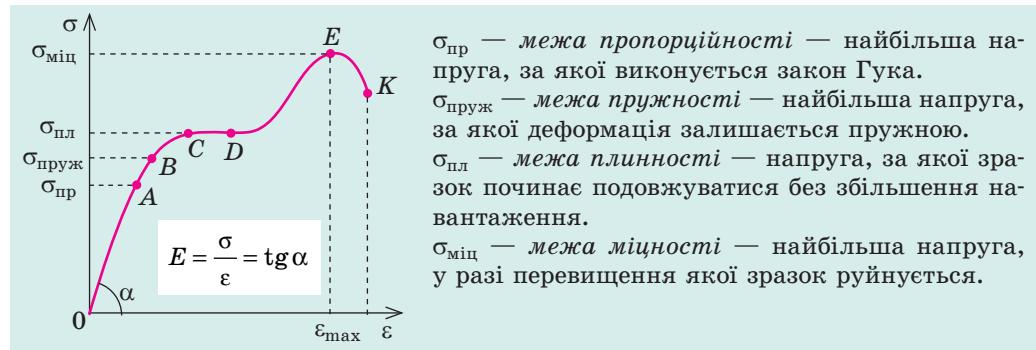
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ або } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \%$$

### 3 Будуємо й аналізуємо діаграму напруг

Залежність механічної напруги від відносного видовження встановлюють експериментально. Зразок витягують за допомогою спеціальної розривної машини, поступово збільшуючи навантаження. У ході дослідження буде діаграма напруг — графік залежності механічної напруги від відносного видовження зразка (рис. 35.2). Досліди показують, що за невеликих деформацій (ділянка ОА графіка) виконується **закон Гука**:

\* Далі розглядатимемо тільки тіла, що мають однакову для даного тіла площину поперечного перерізу (шнури, стрижні, троси тощо).

\*\* Відносне видовження  $\varepsilon$  узято за модулем, оскільки закон Гука справджується як для деформації розтягнення ( $\varepsilon > 0$ ), так і для деформації стиснення ( $\varepsilon < 0$ ).



**Рис. 35.2.** Діаграма напруг:  $OAB$  — ділянка пружних деформацій;  $BC$  — ділянка пластичних деформацій;  $CD$  — ділянка плинності матеріалу;  $EK$  — руйнування зразка

Коефіцієнт пропорційності  $E$  називають *модулем Юнга* або *модулем пружності*. Модуль Юнга характеризує пружні властивості матеріалу, його визначають за діаграмою напруг (див. рис. 35.2) і фіксують у таблицях.

*Одниця модуля Юнга в СІ — паскаль:*

$$[E] = 1 \text{ Па (Pa).}$$



Скориставшись означеннями механічної напруги  $\sigma$  і відносного видовження  $\epsilon$ , приведіть закон Гука, поданий у вигляді  $\sigma = E|\epsilon|$ , до вигляду  $F_{\text{пруж}} = k|\Delta l|$ . Доведіть, що жорсткість  $k$  стрижня визначається за формулою  $k = E \frac{S}{l_0}$ .

Повернемося до рис. 35.2. Як тільки навантаження стане таким, що механічна напруга в зразку сягне *межі пропорційності*  $\sigma_{\text{пр}}$ , залежність  $\sigma(\epsilon)$  стає нелінійною (ділянка  $AB$  графіка), проте якщо зняти навантаження, то зразок відновить свої форму та розміри, тобто ділянка  $OAB$  діаграми напруг — це ділянка *пружних деформацій*.

Якщо збільшувати навантаження далі, то після досягнення *межі пружності*  $\sigma_{\text{пруж}}$  деформація починає швидко зростати і стає *пластичною* (ділянка  $BC$ ), а після досягнення *межі плинності*  $\sigma_{\text{пл}}$  зразок взагалі деякий час подовжується без збільшення навантаження (ділянка  $CD$ ). Якщо навантаження знову збільшити, зразок ще трохи видовжиться (ділянка  $DE$ ), напруга в зразку сягне *межі міцності*  $\sigma_{\text{міц}}$ , після чого зразок розірветься.

*Модулі Юнга  
для деяких матеріалів*

Матеріал	Модуль Юнга $E, \times 10^9 \text{ Па}$
Алюміній	63–70
Бетон	15–40
Каучук	$7,9 \cdot 10^{-3}$
Мідь (лиття)	82
Срібло	82,7
Скло	49–78
Чавун ковкий	150

#### 4

#### Пружність, пластичність, крихкість

Зігнемо стальну лінійку, а потім відпустимо її — лінійка повністю відновить свою форму. Якщо те саме зробити зі свинцевою пластинкою, вона так і залишиться зігнутою. А от якщо спробувати зігнути пластинку зі скла, то скло зламається навіть за незначної деформації. Залежно від «реакції» матеріалу на деформацію розрізняють *пружні*, *пластичні*, *крихкі* матеріали.

Пружні матеріали	Пластичні матеріали	Крихкі матеріали
Матеріали, які виявляють пружні властивості за порівняно великих деформацій або за досить тривалої дії	Матеріали, в яких пружна деформація переходить у пластичну за незначних деформацій	Матеріали, які руйнуються за дуже малих деформацій і майже не виявляють пластичних властивостей



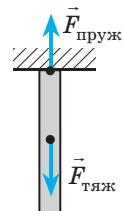
Розподіл матеріалів на пружні, пластичні і крихкі значною мірою є умовним, адже властивості матеріалів суттєво залежать від вологості, температури, швидкості збільшення навантаження тощо. Наприклад, свинець, який є пластичним за нормальних умов, стає пружним за температури  $-100^{\circ}\text{C}$ , пружна гума за низьких температур стає крихкою. Глина є крихкою в сухому стані і пластичною — у вологому. Бітум під час повільного збільшення навантаження виявляє пластичні властивості, а під час швидкого збільшення навантаження стає крихким.

## 5

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Із гелікоптера, який завис на деякій висоті, спускають сталевий трос. Якою може бути найбільша довжина троса, щоб він не обірвався під власною вагою? Межа міцності сталі — 320 МПа.

**Аналіз фізичної проблеми.** Виконаємо пояснівальний рисунок. Сила пружності в будь-якому перерізі троса зрівноважує силу тяжіння, яка діє на частину троса, розташовану нижче цього перерізу. Очевидно, що за відсутності дефектів трос розірветься в якнайвищому перерізі.



**Дано:**

$$\sigma_{\max} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$$

$$l = ?$$

**Розв'язання**

Трос перебуває у стані спокою, тому

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{пруж.}}$$

$$F_{\text{тяж}} = mg,$$

де  $m = \rho V$ , а  $V = Sl$ ,

$$\text{тому } F_{\text{тяж}} = \rho Sl g.$$

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S} —$$

за означенням,

$$\text{тому } F_{\text{пруж}} = \sigma S.$$

Отже, маємо:  $\rho Sl g = \sigma S \Rightarrow l = \frac{\sigma}{\rho g}$ . Густину сталі визначимо за таблицею густин.

**Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:**

$$[l] = \frac{\text{Па}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; \quad l = \frac{3,2 \cdot 10^8}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 10} \approx 4,1 \cdot 10^3 \text{ (м)}.$$

**Аналіз результату.** Найбільша можлива довжина троса — 4,1 км. Оскільки реальні троси мають у десятки разів меншу довжину, то вони ніколи не можуть обірватися під дією власної ваги.

**Відповідь:**  $l = 4,1 \text{ км.}$



## Підбиваємо підсумки

- Деформація — зміна форми та (або) розмірів тіла. Деформація є пружною, якщо після припинення дії зовнішніх сил тіло відновлює свої форму та розміри; деформація є пластичною, якщо форма та розміри тіла не відновлюються. Розрізняють також деформації стиснення (розтягнення), зсуву, вигину, кручення.
- Фізичну величину, яка характеризує деформоване тіло і дорівнює відношенню модуля сили пружності  $F_{\text{пруж}}$  до площини  $S$  поперечного перерізу тіла, називають механічною напругою  $\sigma$ :  $\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$ .
- Закон Гука: для малих пружніх деформацій розтягнення і стиснення механічна напруга прямо пропорційна відносному видовженню  $\varepsilon$ :  $\sigma = E\varepsilon$ , де  $E$  — модуль Юнга (модуль пружності), який характеризує пружні властивості речовини. Найбільшу напругу, за якої виконується закон Гука, називають межею пропорційності  $\sigma_{\text{пр}}$ .



## Контрольні запитання

1. Що таке деформація? 2. Назвіть види деформації. За яких умов вони виникають? Наведіть приклади. 3. Дайте характеристику механічної напруги як фізичної величини. 4. Подайте два формулювання закону Гука. За яких умов виконується цей закон? 5. Що характеризує модуль Юнга? Якою є його одиниця в СІ? 6. У чому полягає явище плинності матеріалу? 7. Що таке межа міцності? Чим пружні матеріали відрізняються від пластичних? від крихких?



## Вправа № 35

1. Чому труби, з яких виготовляють рангоут парусника, є порожніми?
2. Поміркуйте, яких деформацій зазнають такі частини парусника (рис. 1): корпус; щогли; дошки палуби; троси такелажу; якірний ланцюг; канат для швартування; вал брашпіля (коловорот для підйому якоря).
3. До гумового шнура завдовжки 10 см і діаметром 2 мм підвісили вантаж масою 31,4 г. Довжина шнура збільшилася на 1 см. Визначте: 1) механічну напругу в шнурі; 2) відносне видовження шнура; 3) модуль Юнга для гуми, з якої виготовлений шнур; 4) найменший діаметр шнура, за якого деформація залишиться пружною (межа пружності для гуми —  $5 \cdot 10^6$  Па).
4. Визначте силу удару під час штамповки мідної монети радіуса 1 см, якщо межа плинності для міді 70 МПа (рис. 2).
5. Яка із поданих на рис. 3 діаграм побудована для пружного матеріалу? пластичного матеріалу? крихкого матеріалу?
6. Уявіть, що ви вирішили побудувати будинок. Визначтесь, які матеріали (пружні, пластичні, крихкі, з якою межею міцності та ін.) ви будете використовувати для фундаменту; стін; стелі; підлоги; балок. Обґрунтуйте свою відповідь. Обов'язково скористайтеся додатковими джерелами інформації.



Рис. 1



Рис. 2

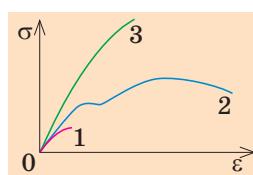


Рис. 3



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

**Тема.** Дослідження ізотермічного процесу.

**Мета:** дослідивши кілька термодинамічних станів газу за однакової температури, експериментально перевірити закон Бойля — Маріотта.

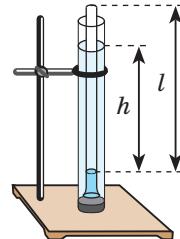
**Обладнання:** закрита з одного кінця скляна трубка, висока скляна посудина, заповнена водою, барометр-анероїд (один на клас), штатив із муфтою і кільцем, лінійка.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

**II**

#### Підготовка до експерименту

Зберіть пристрій (див. [рисунок](#)); у посудину опустіть трубку відкритим кінцем униз на максимальну глибину.

**►**

#### Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Виміряйте барометром атмосферний тиск  $p_{\text{атм}}$ , результат подайте в кілопаскалях.

2. Виміряйте висоту  $l$  стовпа повітря в трубці.

*Зверніть увагу:* площа поперечного перерізу трубки є незмінною, тому об'єм  $V$  повітря в трубці прямо пропорційний висоті  $l$  його стовпа:  $V \sim l$ . Тобто для перевірки закону Бойля — Маріотта достатньо дістати, що  $pl = \text{const}$  за будь-якої глибини занурення трубки.

3. Визначте тиск повітря в трубці. Для цього:

1) виміряйте різницю рівнів води в посудині і трубці ( $h$ );

2) обчисліть і подайте в кілопаскалях гідростатичний тиск стовпа води висотою  $h$ :  $p_{\text{гідр}} = \rho gh$ , де  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  — густина води,  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  — прискорення вільного падіння;

3) обчисліть тиск  $p$  повітря в трубці:  $p = p_{\text{атм}} + p_{\text{гідр}}$ .

4. Повторіть дослід ще двічі, щоразу зменшуючи глибину занурення.

Номер досліду	Атмосферний тиск $p_{\text{атм}}$ , кПа	Висота стовпа повітря $l$ , м	Різниця рівнів води $h$ , м	Гідростатичний тиск $p_{\text{гідр}}$ , кПа	Тиск повітря $p$ , кПа	Добуток $C = pl$ , кПа·м

**►**

#### Опрацювання результатів експерименту

1. Для кожного термодинамічного стану повітря в трубці обчисліть добуток тиску і висоти стовпа повітря:  $C = pl$ .

2. Оцініть відносну похибку експерименту:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{C_1}{C_3} \right| \cdot 100 \%$ .

**■**

#### Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту зробіть висновок, де зазначте: 1) закон, який ви експериментально перевіряли; 2) величини, які вимірювали; 3) результат перевірки; 4) причини похибки; 5) величину, вимірювання якої дає найбільшу похибку.

**+**

#### Творче завдання

Чи зміняться результати експерименту, якщо для його проведення використати трубку з більшою або меншою площею поперечного перерізу? Якщо зміняться, то як? Обґрунтуйте свою відповідь. Виконайте експериментальну перевірку свого припущення, запишіть результати.

**Тема.** Вимірювання поверхневого натягу рідини.

**Мета:** виміряти поверхневий натяг води методом відриву крапель.

**Обладнання:** штангенциркуль, медичний шприц об'ємом 2 мл без голки, зубочистка, склянка з дистильованою водою.

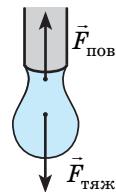
## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

### Теоретичні відомості

У ході повільного витікання рідини з тонкої вертикальної трубки на кінці трубки утворюється крапля (див. [рисунок](#)). Відрив краплі відбувається в той момент, коли сила тяжіння зрівнюється із силою поверхневого натягу, що діє на краплю вздовж кола шийки краплі:

$$F_{\text{пов}} = F_{\text{тяж}}, \text{ або } m_0g = \sigma l,$$

де  $m_0$  — маса краплі;  $\sigma$  — поверхневий натяг рідини;  $l = \pi d$  — довжина кола ( $d$  — внутрішній діаметр трубки).



Масу краплі можна знайти за формулою:  $m_0 = \rho V_0 = \frac{\rho V}{N}$ , де  $\rho$  — густина рідини;  $V$  — об'єм рідини, що витекла;  $N$  — кількість крапель.

Отже, вимірявши внутрішній діаметр трубки  $d$  і порахувавши кількість  $N$  крапель, що утворилися під час витікання рідини об'ємом  $V$ , можна обчислити поверхневий натяг рідини:  $\sigma = \frac{\rho V g}{N \pi d}$ .

### Експеримент

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

1. Виміряйте діаметр вихідного отвору шприца.
2. Наберіть у шприц 2 мл води. Повільно натискаючи на поршень і рахуючи краплі, викапайте воду у склянку.
3. Повторіть дослід ще 3–4 рази.

Номер досліду	Діаметр отвору $d, \times 10^{-3}$ м	Об'єм води $V, \times 10^{-6}$ м <sup>3</sup>	Кількість крапель		Поверхневий натяг $\sigma_{\text{sep}}, \times 10^{-3}$ Н/м
			$N$	$N_{\text{sep}}$	

### Опрацювання результатів експерименту

1. За результатами дослідів знайдіть середню кількість крапель  $N_{\text{sep}}$ .
2. Обчисліть середнє значення поверхневого натягу води  $\sigma_{\text{sep}}$ .
3. Оцініть відносну похибку експерименту, порівнявши отримане значення поверхневого натягу води з табличним.

### Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту зробіть висновок, у якому зазначте: 1) величину, яку ви вимірювали; 2) отриманий результат; 3) причини похибки; 5) чи здається вам запропонований спосіб зручним.

### Творче завдання

Запропонуйте експеримент щодо виявлення залежності поверхневого натягу рідини від температури рідини та від наявності в рідині домішок. Проведіть експерименти, зробіть висновок.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ III «МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА» Частина 1. Молекулярна фізика

1. Ви згадали основні положення МКТ і їх дослідницьке обґрунтування.

## Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Усі речовини складаються з частинок — атомів, молекул, іонів

- 1 моль речовини містить  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  частинок.
- Маса частинки:  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ , де  $M$  — молярна маса.
- Кількість молекул:  $N = \frac{m}{M} N_A = v N_A$ , де  $v$  — число молів (кількість речовини)

Частинки безперервно хаотично рухаються

Середня квадратична швидкість поступального руху молекул:  $\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ , де  $T$  — абсолютна температура:  $T = t + 273$  (К);  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — універсальна газова стала

Частинки взаємодіють одна з одною:

- притягуються на відстанях, які більші за розмір частинок;
- відштовхуються на відстанях, які менші від розміру частинок

2. Ви дізналися про фізичну модель «ідеальний газ» і про важливі закони, які пов'язують макроскопічні і мікроскопічні параметри цього газу:

### Основне рівняння МКТ ідеального газу

$$p = \frac{1}{3} \rho v^2 \leftarrow p = \frac{1}{3} m_0 n v^2 \rightarrow p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$$

$$p = n k T$$

Рівняння Менделеєва — Клапейрона (рівняння стану ідеального газу)

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

Рівняння Клапейрона

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

Зв'язок середньої кінетичної енергії поступального руху молекул і температури:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} k T$$

$p$  — тиск газу;  $V$  — об'єм газу;  $n = \frac{N}{V}$  — концентрація молекул газу;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — стала Больцмана

Ізотермічний процес  $T_1 = T_2$

Закон Бойля — Маріотта:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$

Ізобарний процес  $p_1 = p_2$

Закон Гей-Люссака:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

Ізохорний процес  $V_1 = V_2$

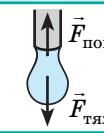
Закон Шарля:  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

3. Ви дізналися, які фізичні величини характеризують вологість повітря; поверхневий шар рідини; стан деформованого тіла.

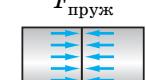
### Вологість повітря

$$\rho_a = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{V} \quad \text{відносна} \quad \varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п}}}$$

### Поверхневий натяг

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S} = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$


### Механічна напруга

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S} \quad \bar{F}_{\text{пруж}}$$


4. Ви довідалися, за яких умов рідина змочує або не змочує певну поверхню, та отримали формулу для розрахунку висоти  $h$  підняття (опускання) рідини в капілярі радіуса  $r$ :  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ III «МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА».

## Частина 1. Молекулярна фізика

Завдання 1–5 містять тільки одну правильну відповідь.

- (1 бал) За нормального атмосферного тиску температура кипіння води за шкалою Кельвіна дорівнює...
    - 0 К;
    - 100 К;
    - 273 К;
    - 373 К.
  - (1 бал) Якої деформації зазнає тканина, яку розрізають ножицями?
    - стиснення;
    - вигину;
    - кручення;
    - зсуву.
  - (1 бал)  $\text{E} = 2$  моль водню,  $2$  моль кисню і  $2$  моль водяної пари. Який газ містить більшу кількість молекул?
    - водень;
    - водяна пара;
    - кисень;
    - кількість молекул однаакова.
  - (1 бал) Коли покази сухого і вологого термометрів психрометра збігаються, це означає, що відносна вологість повітря дорівнює...
    - 100 %;
    - 50 %;
    - 10 %;
    - 0 %.
  - (2 бали) На рис. 1 зображені графіки процесів зміни стану ідеального газу. Який графік відповідає ізобарному охолодженню газу?
    - 1;
    - 2;
    - 3;
    - 4.
  - (4 бали) Установіть відповідність між фізичними явищами і законами, які їх описують.

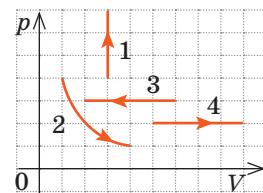


Рис. 1

- 1 Бульбашка, піднімаючись із глибини рівномірно прогрітої водойми, збільшується в об'ємі

2 Залізна голка лежить на поверхні води

3 Герметично закритий балон із газом, який нагрівається на сонці, може вибухнути

4 Об'єм, який займає 1 моль ідеального газу за однакових умов, не залежить від виду газу

7. (3 бали) Скільки молекул газу міститься в посудині ємністю 1,0 л за тиску  $1,2 \cdot 10^5$  Па і температури 30 °C?

8. (3 бали) На рис. 2 зображено графік процесу, що відбувається з ідеальним газом. Як у ході цього процесу змінювалися тиск, об'єм і температура газу?

9. (4 бали) Удень температура повітря дорівнює 28 °C, відносна вологість повітря — 60 %. Чи випаде вночі роса, якщо температура повітря знизиться до 20 °C?

10. (4 бали) Вода в капілярі піднялася на висоту 2,4 см. Визначте діаметр капіляра. На скільки зміниться висота підняття рідини в капілярі, якщо взяти капіляр удвічі більшого радіуса? скористатися замість води спиртом? перенести дослід на Марс? Вважайте, що  $g_3 \approx 10 \text{ м/с}^2$ ,  $g_M \approx 4 \text{ м/с}^2$ .

**А**  $F_{\text{пруж}} = \sigma S$   
**Б**  $pV = vRT$   
**В**  $p_1 V_1 = p_2 V_2$   
**Г**  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$   
**Д**  $mg = \sigma l + F_{\text{арх}}$



Рис. 2

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і визначте суму балів. Поділіть цю суму на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

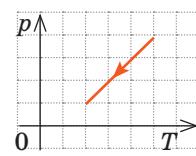


Рис. 2



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

## ЧАСТИНА 2. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ



### § 36. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ І СПОСОБИ ЇЇ ЗМІНИ

МКТ стала загальновизнаною на межі XIX і XX століть. Задовго до її створення дослідженням теплових процесів займалася *термодинаміка* — розділ фізики, що вивчає співвідношення і перетворення теплової та інших форм енергії. В основі термодинаміки лежить поняття *внутрішньої (теплової) енергії*. Про внутрішню енергію та процеси, в результаті яких вона змінюється, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1

#### Внутрішня енергія та її особливості

Внутрішня енергія макроскопічного тіла визначається характером руху та взаємодії всіх мікрочастинок, з яких складається тіло (система тіл). Таким чином, до внутрішньої енергії слід віднести:

- кінетичну енергію хаотичного (теплового) руху частинок речовини (атомів, молекул, іонів);
- потенціальну енергію взаємодії частинок речовини;
- енергію взаємодії атомів у молекулах (хімічну енергію);
- енергію взаємодії електронів і ядра в атомі (внутрішньоатомну енергію);
- енергію взаємодії нуклонів у ядрі (внутрішньоядерну енергію).

Однак для описування теплових процесів є важливим не стільки значення *внутрішньої енергії*, як її зміна. У ході теплових процесів хімічна енергія, а також внутрішньоатомна і внутрішньоядерна енергії практично не змінюються. Саме тому **внутрішня енергія в термодинаміці визначається як сума кінетичних енергій хаотичного (теплового) руху частинок речовини (атомів, молекул, іонів)**, з яких складається тіло, і потенціальних енергій їх взаємодії.

Внутрішню енергію позначають символом *U*.

Одиниця внутрішньої енергії в СІ — джоуль:  $[U]=1$  Дж (J).

#### Особливості внутрішньої енергії ідеального газу

1. Атоми і молекули ідеального газу практично не взаємодіють між собою, тому *внутрішня енергія ідеального газу дорівнює кінетичній енергії поступального та обертовального рухів його частинок*.

2. *Внутрішня енергія даної маси ідеального газу прямо пропорційна його абсолютної температурі*.

Доведемо це твердження для одноатомного газу. Атоми такого газу рухаються тільки поступально, тому, щоб визначити його внутрішню енергію, слід середню кінетичну енергію поступального руху атомів  $\left(\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT\right)$  помножити на кількість атомів  $\left(N = \frac{m}{M}N_A\right)$ . Таким чином:  $U = \bar{E}_k \cdot N = \frac{3}{2}kT \cdot \frac{m}{M}N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{M}kN_A T$ . Отже, *для одноатомного ідеального газу:*

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

Використавши рівняння Менделєєва — Клапейрона  $pV = \frac{m}{M} RT$ , вираз для внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу можна подати так:

$$U = \frac{3}{2} pV$$

3. *Внутрішня енергія — функція стану системи*, тобто вона однозначно визначається основними макроскопічними параметрами ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ), що характеризують систему, і незалежно від того, яким чином систему переведено з одного стану в інший, зміна внутрішньої енергії буде однаковою.

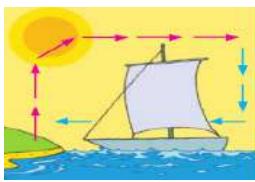
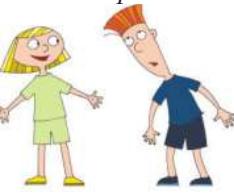
4. *Внутрішню енергію можна змінити двома способами: виконанням роботи і теплопередачею*.

2

### Які існують види теплопередачі

**Теплопередача (теплообмін)** — процес зміни внутрішньої енергії тіла або частин тіла без виконання роботи.

Процес теплопередачі можливий тільки в разі наявності різниці температур. *Довільно внутрішня енергія завжди передається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого*. Чим більша різниця температур, тим швидше — за інших рівних умов — відбувається процес передачі тепла.

Види теплопередачі		
Теплопровідність	Конвекція	Випромінювання
<p>Вид теплопередачі, який зумовлений хаотичним рухом частинок речовини та не супроводжується перенесенням цієї речовини. Найкращими провідниками тепла є метали, погано проводять тепло дерево, скло, шкіра, рідини (крім рідких металів); найгірші провідники тепла — гази. Передача енергії від гарячої води до батареї опалення, від поверхні води до її нижніх шарів тощо відбувається завдяки теплопровідності.</p> 	<p>Вид теплопередачі, за якого тепло переноситься потоками рідини або газу. Теплі потоки рідини або газу мають меншу густину, тому під дією архімедової сили піднімаються, а холодні потоки — опускаються. Завдяки конвекції здійснюється циркуляція повітря в приміщенні, нагрівається рідина в каструлі, що стоїть на плиті, існують вітри і морські течії та ін.</p> <p>У твердих тілах конвекція неможлива.</p> 	<p>Вид теплопередачі, за якого енергія передається за допомогою електромагнітних хвиль. Найуніверсальніший вид теплопередачі: тіла завжди випромінюють і поглинають інфрачервоні (теплові) електромагнітні хвилі. Це єдиний вид теплообміну, який можливий у вакуумі (енергія від Сонця передається тільки випромінюванням).</p> <p>Краще випромінюють і поглинають енергію тіла з темною поверхнею.</p> 



Чому сковороду виготовляють з металу, а її ручку — з деревини? Чому вдень вітер дме з моря, а вночі — із суходолу? Чому в спеку надівають світлий одяг?

## 3

## Як визначити кількість теплоти

Кількість теплоти  $Q$  — це фізична величина, що дорівнює енергії, яку тіло одержує (або віддає) в ході теплопередачі.

Одиниця кількості теплоти в СІ — джоуль:  $[Q] = 1 \text{ Дж (J)}$ .

Із курсу фізики 8 класу ви знаєте, що кількість теплоти, яка поглинається при нагріванні речовини (або виділяється при її охолодженні), обчислюють за формулою:  $Q = cm\Delta T = cm\Delta t$ , де  $c$  — питома теплоємність речовини;  $m$  — маса речовини;  $\Delta T = T - T_0 = t - t_0$  — зміна температури.

Зверніть увагу! Добуток питомої теплоємності і маси речовини, з якої виготовлено тіло, називають теплоємністю тіла:  $C = cm$ .

Якщо відома теплоємність  $C$  тіла, то кількість теплоти  $Q$ , яку отримує тіло під час зміни температури на  $\Delta T$ , обчислюють за формулою:  $Q = C\Delta T$ .

## Розрахунок кількості теплоти в разі фазових переходів

Кристалічний стан $\leftrightarrow$ Рідкий стан	Рідкий стан $\leftrightarrow$ Газоподібний стан
<p>Температуру, за якої відбуваються фазові переходи «кристал <math>\rightarrow</math> рідина» і «рідина <math>\rightarrow</math> кристал», називають температурою плавлення — вона залежить від роду речовини і зовнішнього тиску.</p> <p>Кількість теплоти <math>Q</math>, яка поглинається при плавленні кристалічної речовини (або виділяється при кристалізації рідини), обчислюють за формулою:</p> $Q = \lambda m,$ <p>де <math>m</math> — маса речовини; <math>\lambda</math> — питома теплота плавлення.</p>	<p>Фазові переходи «рідина <math>\rightarrow</math> пара» і «пара <math>\rightarrow</math> рідина» відбуваються за будь-якої температури.</p> <p>Кількість теплоти <math>Q</math>, яка поглинається при пароутворенні (або виділяється при конденсації), обчислюють за формулою:</p> $Q = rm, \text{ або } Q = Lm,$ <p>де <math>m</math> — маса речовини; <math>r(L)</math> — питома теплота пароутворення за даної температури (зазвичай у таблицях подають питому теплоту пароутворення за температури кипіння рідини).</p>

Нагадаємо: і під час плавлення, і під час кипіння температура речовини не змінюється.

## 4

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Неон масою 100 г міститься в колбі об'ємом 5,0 л. У процесі ізохорного охолодження тиск неону зменшився від 100 до 50 кПа. На скільки при цьому змінилися внутрішня енергія і температура неону?

Дано:

$$m = 0,10 \text{ кг}$$

$$V = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$p_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$\Delta U = ?$$

$$\Delta T = ?$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Неон — одноатомний газ; для таких газів зміна внутрішньої енергії дорівнює:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

$$\text{або } \Delta U = \frac{3}{2} p_2 V_2 - \frac{3}{2} p_1 V_1.$$

Оскільки охолодження ізохорне, об'єм неону не змінюється:  $V_1 = V_2 = V$ .

Після перетворень маємо:  $\Delta U = \frac{3}{2} V (p_2 - p_1)$ ;  $\Delta T = \frac{2M\Delta U}{3mR}$ .

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\Delta U] = \text{м}^3 \cdot \text{Па} = \text{м}^3 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,5 \cdot 10^5) = -375 \text{ (Дж);}$$

$$[\Delta T] = \frac{\text{кг} / \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})} = \text{К}; \quad \Delta T = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot (-375)}{3 \cdot 0,1 \cdot 8,31} = -6 \text{ (К).}$$

*Аналіз результатів.* Знак «-» свідчить про те, що внутрішня енергія і температура неону зменшилися, — це відповідає ізохорному охолодженню.

*Відповідь:*  $\Delta U = -375 \text{ Дж}$ ;  $\Delta T = -6 \text{ К}$ .

**Задача 2.** Внутрішня алюмінієва посудина калориметра має масу 50 г і містить 200 г води за температури 30 °C. У посудину кинули кубики льоду за температури 0 °C, унаслідок чого температура води в калориметрі знизилася до 20 °C. Визначте масу льоду. Питомі теплоємності води та алюмінію дорівнюють:  $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_{\text{Al}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ; питома теплота плавлення льоду — 334 кДж/кг.

*Аналіз фізичної проблеми.* Калориметр має таку будову, що теплообмін із довкіллям майже відсутній, тому для розв'язання задачі скористаємося рівнянням теплового балансу. У теплообміні беруть участь три тіла: вода, внутрішня посудина калориметра, лід.

*Дано:*

$$m_{\text{Al}} = 0,05 \text{ кг}$$

$$m_{\text{в}} = 0,2 \text{ кг}$$

$$t_{\text{в}} = t_{\text{Al}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{л}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_{\text{Al}} = 920 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 334 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$m_{\text{л}} = ?$$

*Віддають енергію*  
вода + алюміній  
охолоджуються від 30 до 20 °C;

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_1, \quad Q_{\text{Al}} = c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} \Delta t_1;$$

$$|\Delta t_1| = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} = 10 \text{ К.}$$

Запишемо рівняння теплового балансу:

$$c_{\text{в}} m_{\text{в}} |\Delta t_1| + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} |\Delta t_1| = \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} \Delta t_2.$$

Після перетворень маємо:

$$|\Delta t_1| (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}}) = m_{\text{л}} (\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2) \Rightarrow m_{\text{л}} = \frac{|\Delta t_1| (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}})}{\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[m_{\text{л}}] = \left( \text{К} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \text{кг} \right) : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$$

$$m_{\text{л}} = \frac{10 \cdot (4200 \cdot 0,2 + 920 \cdot 0,05)}{334000 + 4200 \cdot 20} \approx 0,021 \text{ (кг).}$$

*Відповідь:*  $m_{\text{л}} = 21 \text{ г}$ .



### Підбиваємо підсумки

- У термодинаміці внутрішню енергію  $U$  тіла розуміють як суму кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини, з яких складається тіло, і потенціальної енергії їх взаємодії. Внутрішня енергія — функція стану системи, вона однозначно визначається основними макроскопічними параметрами ( $p, V, T$ ), що характеризують систему. Внутрішню енергію ідеального одноатомного газу визначають за формулами:  $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$ ;  $U = \frac{3}{2} pV$ .
- Внутрішню енергію можна змінити двома способами: виконанням роботи і теплопередачею. Теплопередача (теплообмін) — процес зміни

внутрішньої енергії тіла або частин тіла без виконання роботи. Існує три види теплопередачі: теплопровідність, конвекція, випромінювання.

• Фізичну величину, що дорівнює енергії, яку тіло одержує або віддає в ході теплопередачі, називають кількістю теплоти  $Q$ . Кількість теплоти можна обчислити за формулами:  $Q = cm\Delta T = C\Delta T$  — кількість теплоти, яка поглинається при нагріванні тіла (або виділяється при його охолодженні);  $Q = \lambda m$  — кількість теплоти, яка поглинається при плавленні речовини (або виділяється при її кристалізації);  $Q = Lm$  — кількість теплоти, яка погли-нається при пароутворенні речовини (або виділяється при її конденсації).

### Контрольні запитання

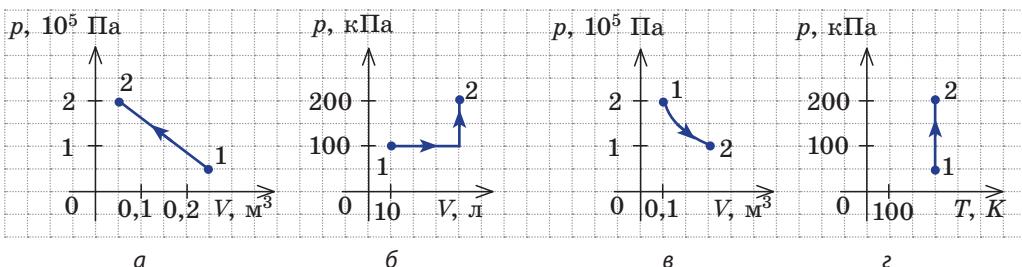


1. Дайте означення внутрішньої енергії.
2. Виведіть формули для розрахунку внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу. Чому цими формулами не можна скористатися, якщо молекули газу складаються з більш ніж одного атома?
3. Які способи зміни внутрішньої енергії ви знаєте?
4. Що таке теплопередача?
5. Які існують види теплопередачі? Дайте їх означення, наведіть приклади.
6. Як розрахувати кількість теплоти, передану тілу під час нагрівання (або виділену ним під час охолодження)?
7. Дайте означення питомої теплоємності тіла.
8. Як обчислити кількість теплоти, необхідну для плавлення кристалічної речовини? для перетворення рідини на пару?

### Вправа № 36



1. Аргон масою 300 г охолоджується від 200 до 50 °С. Визначте зміну внутрішньої енергії аргону.
2. Об'єм неону масою 40 г у ході ізобарного розширення збільшився від 12 до 15 л. Визначте зміну внутрішньої енергії і зміну температури неону, якщо його тиск дорівнює 50 кПа.
3. Ідеальний одноатомний газ переходить зі стану 1 у стан 2 (рис. а–г). Для кожного випадку визначте зміну внутрішньої енергії газу.



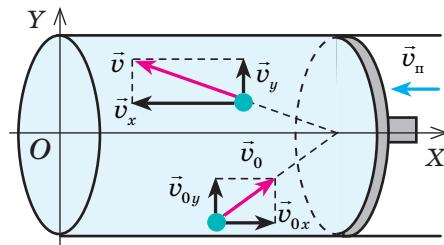
4. Залізний бруск масою 600 г нагріли у воді, що кипить, і опустили в посудину з водою, температура якої 10 °С. У результаті температура води підвищилася до 12 °С. Визначте масу води, якщо теплоємність посудини 100 Дж/К; питома теплоємність заліза 460 Дж/(кг·К); питома теплоємність води 4200 Дж/(кг·К). Втратами енергії знехтуйте.
5. У суміш, яка складається з 20 л води і 1 кг льоду, влили розплавлений свинець за температури плавлення (327 °С). У результаті температура води стала дорівнювати 100 °С, причому 100 г води перейшло в пару. Визначте масу влитого свинцю. Питома теплоємність свинцю становить 125 Дж/(кг·К), води — 4200 Дж/(кг·К); питома теплота плавлення свинцю 21 кДж/кг, льоду — 334 кДж/кг; питома теплота пароутворення води — 2,3 МДж/кг.

## § 37. РОБОТА В ТЕРМОДИНАМІЦІ

Наприкінці XVIII ст. англійський фізик Бенджамін Томпсон (граф Румфорд) досліджував тепло, що виділяється під час свердління бронзових гармат. Румфорд устигав закип'ятити поставлені на гарматах казани з водою за рахунок тепла, що виділялося, поки коні рухали дуже тупе свердло. У цьому випадку енергія механічного руху свердла перетворювалася на енергію хаотичного руху молекул бронзи та води. А чи можна зробити навпаки?

### 1 Чому при зміні об'єму газу змінюється його внутрішня енергія

Внутрішня енергія газу може змінюватися, якщо зовнішні сили, що діють на нього, виконують роботу (додатну або від'ємну). Наприклад, якщо газ стискають (газ виконує від'ємну роботу) (рис. 37.1) і він при цьому не віддає енергію навколошньому середовищу, то швидкість руху молекул газу, а відповідно, і внутрішня енергія, і температура газу збільшуються. І навпаки, якщо газ розширяється (тобто виконує додатну роботу), то швидкість руху молекул, температура і внутрішня енергія газу зменшуються.



**Рис. 37.1.** При стисненні газу швидкість руху молекул після зіткнення з поршнем збільшується ( $v > v_0$ ) — газ нагрівається. (Аналогічно збільшується швидкість руху м'яча після удару волейболіста, коли рука рухається назустріч м'ячу.)

### 2 Як обчислити роботу газу

Обчислимо роботу, яку виконує сила тиску газу при зміні його об'єму від  $V_1$  до  $V_2$ . За означенням роботи:  $A = Fscos\alpha$ .

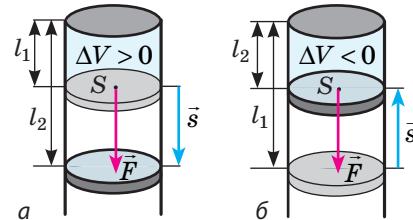
Якщо газ розширяється ізобарно, то сила, яка діє з боку газу на поршень, є не-змінною:  $F = pS$  ( $p$  — тиск газу;  $S$  — площа поршня); модуль переміщення поршня  $s = l_2 - l_1$  (рис. 37.2, a);  $\alpha = 0$ .

Таким чином, *робота газу в результаті його ізобарного розширення дорівнює:*

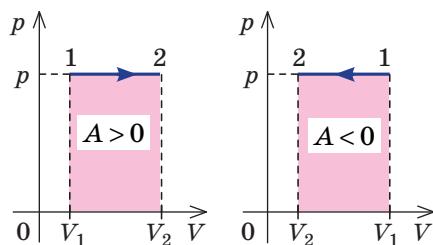
$$A = Fscos\alpha = pS(l_2 - l_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

Доведіть, що у випадку *ізобарного стиснення* (рис. 37.2, б) робота газу є від'ємною й обчислюється за формулою  $A = p\Delta V$ , причому  $\Delta V < 0$ .

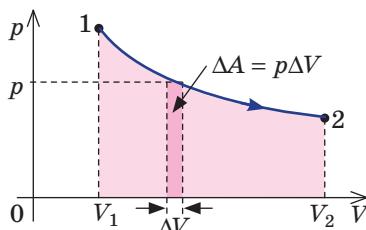
Роботі газу в разі ізобарного розширення (або стиснення) можна дати просте геометричне тлумачення: *робота газу чисельно дорівнює площі прямокутника під графіком залежності  $p(V)$*  (рис. 37.3).



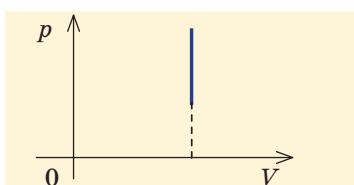
**Рис. 37.2.** До виведення формули роботи газу: а — газ розширяється; б — газ стискається.  $\vec{F}$  — сила тиску газу;  $\vec{s}$  — переміщення поршня



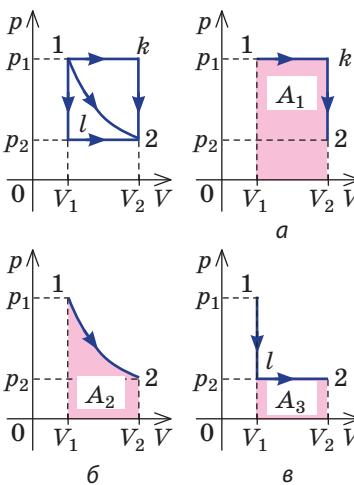
**Рис. 37.3.** Геометричний зміст роботи при ізобарному процесі



**Рис. 37.4.** Геометричний зміст роботи при довільному процесі: робота газу чисельно дорівнює площі криволінійної трапеції під графіком залежності  $p(V)$



**Рис. 37.5.** При ізохорному процесі газ роботу не виконує



**Рис. 37.6.** Три шляхи переходу газу зі стану 1 у стан 2: *a* — газ ізобарно розширяється (ділянка *1k*), потім ізохорно охолоджується (ділянка *k2*); *b* — газ ізотермічно розширяється; *c* — газ ізохорно охолоджується (ділянка *1l*), потім ізобарно розширяється (ділянка *l2*). Площі фігур під графіками показують:  $A_1 > A_2 > A_3$

Нехай деякий газ *довільно* переходить зі стану 1 у стан 2 (рис. 37.4). Якщо зміна об'єму газу ( $\Delta V$ ) досить мала, то тиск газу можна вважати незмінним. Тоді робота газу чисельно дорівнюватиме площі виділеної на рисунку смужки. Повна робота при змінюванні об'єму від  $V_1$  до  $V_2$  дорівнюватиме сумі площ усіх смужок, тобто площі *криволінійної трапеції* під графіком залежності  $p(V)$ .

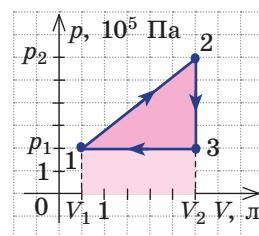
Очевидно, що при *ізохорному процесі* ( $V = \text{const}$ ) площа фігури під графіком залежності  $p(V)$  дорівнює нулю (рис. 37.5), — газ *роботу не виконує* ( $A = 0$ ).

*Робота газу залежить від того, яким шляхом відбувався переход газу з початкового стану в кінцевий* (рис. 37.6).

### 3 Учимося розв'язувати задачі

#### Задача.

На рисунку графічно зображене циклічний процес, здійснений ідеальним газом. Визначте роботу, яку виконав газ за цикл.



*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Повна робота за цикл дорівнює сумі робіт, виконаних у ході кожного процесу циклу. Згідно з геометричним змістом роботи робота газу в ході процесу 1–2 чисельно дорівнює площі прямокутної трапеції, основи якої дорівнюють  $p_1$  і  $p_2$ , а висота —  $(V_2 - V_1)$ ; об'єм газу збільшується, тому ця робота додатна. Робота газу в ході процесу 2–3 дорівнює нулю, оскільки цей процес ізохорний. Робота газу в ході процесу 3–1 чисельно дорівнює площі прямокутника зі сторонами  $p_1$  і  $(V_1 - V_2)$ ; об'єм газу зменшується, тому ця робота від'ємна. Отже, для визначення роботи за весь цикл потрібно від площі трапеції відняти площину прямокутника. Тобто, як видно з рисунка, робота за цикл чисельно дорівнює площі прямокутного трикутника 1–2–3:

$$A = \frac{(p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)}{2}.$$

Необхідні значення величин знайдемо з графіка:

$$p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad p_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$V_1 = 0,5 \text{ л} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad V_2 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж};$$

$$A = \frac{(6 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5) \cdot (3 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3})}{2} = 5 \cdot 10^2 \text{ (Дж)}.$$

Відповідь:  $A = 0,5 \text{ кДж}$ .



### Підбиваємо підсумки

- У разі відсутності теплообміну з довкіллям, якщо над газом виконується додатна робота, то внутрішня енергія газу збільшується; якщо газ сам виконує роботу, його внутрішня енергія зменшується.
- Робота газу чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності  $p(V)$ . Якщо об'єм газу збільшується, то газ виконує додатну роботу. Якщо об'єм газу зменшується, то робота газу від'ємна. При ізобарному процесі роботу газу можна визначити за формулою  $A = p\Delta V$ , при ізохорному процесі робота газу дорівнює нулю:  $A = 0$ .



### Контрольні запитання

- Яким є геометричний зміст роботи? 2. Виведіть формулу для розрахунку роботи під час ізобарного процесу. 3. Чому дорівнює робота під час ізохорного процесу? 4. Чи залежить виконана робота від способу переведення тіла з одного стану в інший? Обґрунтуйте свою відповідь.



### Вправа № 37

- Наведіть приклади зміни внутрішньої енергії твердих тіл, рідин і газів у результаті виконання роботи. Зазначте, яку роботу — додатну чи від'ємну — вони при цьому виконують.
- Кисень масою 320 г нагрівають ізобарно від  $-20$  до  $27^\circ\text{C}$ . Визначте роботу газу під час цього процесу.
- У циліндрі під поршнем міститься 2 моль деякого газу. Яку роботу виконав цей газ у ході ізобарного нагрівання від 273 до 473 К?
- Ідеальний газ здійснив циклічні процеси, графічно зображені на рис. 1. Визначте роботу, яку виконав газ у ході кожного циклу.
- На рис. 2 подано графіки двох замкнених процесів, здійснених тим самим газом. У ході якого з цих процесів газ виконав більшу роботу?

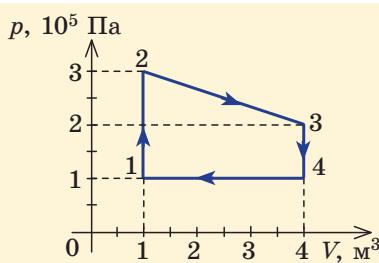
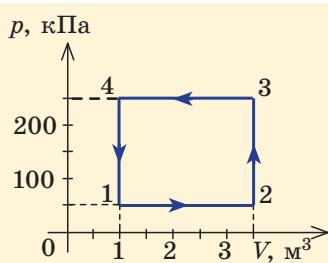


Рис. 1

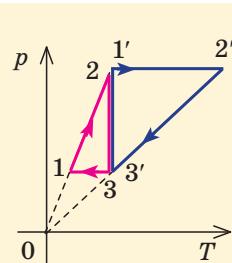


Рис. 2



## § 38. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС



Один із фундаментальних законів природи — закон збереження та перетворення енергії. Уперше до відкриття цього закону дійшов німецький лікар і фізик Юліус Роберт фон Маєр (1814–1878). Як це не дивно, на відкриття вченого наштовхнули спостереження над зміною кольору крові в людей. Маєр помітив, що венозна кров у тих, хто живе в тропіках, світліша, ніж у жителів його країни, і кольором нагадує артеріальну. Він

зробив висновок, що різниця в кольорі зумовлена кількістю споживання кисню, або «силою процесу згоряння», який відбувається в організмі. Незалежно від Маєра й зовсім інакше до закону збереження енергії дійшли англійський промисловець і вчений Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) і німецький фізик, фізіолог і психолог Герман Людвіг Фердинанд фон Гельмгольц (1821–1894).

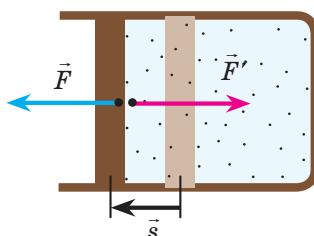
Закон збереження та перетворення енергії керує всіма явищами природи, невідомо жодного випадку, коли б цей закон не виконувався. Із цього параграфа ви дізнаєтесь про закон збереження та перетворення енергії в термодинаміці.

**1**

### Перший закон термодинаміки

У термодинаміці розглядаються системи, механічна енергія яких при переході з одного термодинамічного стану в інший не змінюється. У такому разі, якщо зовнішні сили виконали роботу  $A'$  й одночасно системі передано певну кількість теплоти  $Q$ , то вся енергія йде на зміну внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ). Закон збереження та перетворення енергії в такому випадку називають **першим законом (началом) термодинаміки**:

Зміна внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ) при переході з одного термодинамічного стану в інший дорівнює сумі роботи  $A'$  зовнішніх сил і кількості теплоти  $Q$ , переданої системі або переданої системою навколошнім тілам у процесі теплообміну:



**Рис. 38.1.** Згідно з третім законом Ньютона сила  $\vec{F}$ , з якою газ тисне на поршень, дорівнює за модулем і протилежно напрямлене зовнішній сили  $\vec{F}'$ , з якою поршень тисне на газ; тому робота зовнішніх сил дорівнює роботі газу, узятій із протилежним знаком:  $A' = -A$

$$\Delta U = A' + Q$$

*Зверніть увагу!* Якщо система одержує певну кількість теплоти, то в наведеній формулі  $Q$  беруть зі знаком «+», якщо віддає, то зі знаком «-».

На практиці частіше розглядають не роботу зовнішніх сил  $A'$ , а роботу  $A$ , яку виконує дана система проти зовнішніх сил. З огляду на те що  $A' = -A$  (рис. 38.1), **перший закон (начало) термодинаміки** можна сформулювати так:

Кількість теплоти  $Q$ , передана системі, йде на зміну внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ) та на виконання системою роботи  $A$  проти зовнішніх сил:

$$Q = \Delta U + A$$

Згідно з першим законом термодинаміки **неможливо створити вічний двигун першого**

роду — циклічний пристрій, який виконував би механічну роботу без споживання енергії ззовні (рис. 38.2, а) або виконував би роботу більшу, ніж споживана ним енергія (рис. 38.2, б).

## 2 Який вигляд має перший закон термодинаміки для ізопроцесів

Розглянемо, якого вигляду набуде перший закон термодинаміки у випадках, якщо ідеальному газу незмінної маси передавати деяку кількість теплоти таким чином, що один із макроскопічних параметрів газу ( $V$ ,  $p$  або  $T$ ) залишатиметься незмінним.

• **Ізохорний процес** (рис. 38.3). У ході цього процесу об'єм газу не змінюється ( $\Delta V = 0$ ) і газ роботу не виконує ( $A = 0$ ), тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U.$$

При ізохорному процесі вся передана газу кількість теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії газу.

Якщо газ ідеальний одноатомний, то кількість теплоти, передана газу, дорівнює:

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

• **Ізотермічний процес** (рис. 38.4). У ході цього процесу температура, а отже, і внутрішня енергія газу не змінюються ( $\Delta U = 0$ ), тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = A.$$

При ізотермічному процесі вся передана газу кількість теплоти йде на виконання механічної роботи.

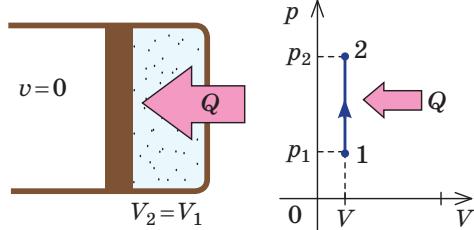


Рис. 38.3. Ізохорне нагрівання газу:  
 $m = \text{const}$ ;  $V = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U$

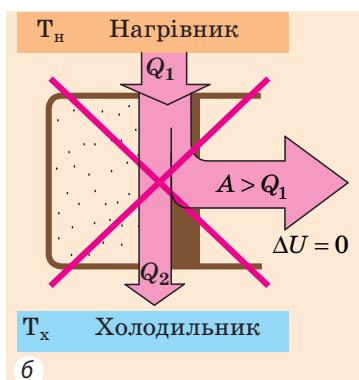
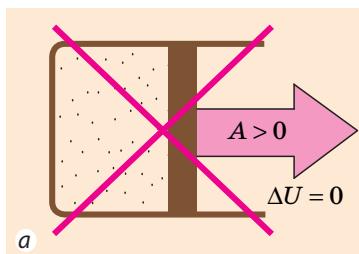


Рис. 38.2. Циклічні процеси, які неможливі з точки зору першого закону термодинаміки

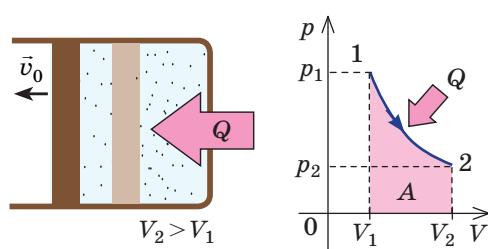
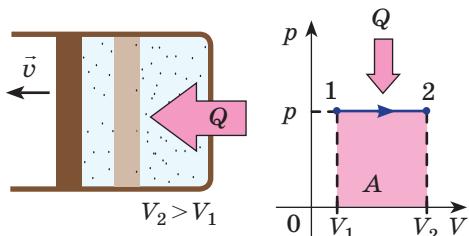


Рис. 38.4. Ізотермічне розширення газу:  
 $m = \text{const}$ ;  $T = \text{const}$ ;  $Q = A$



**Рис. 38.5.** Ізобарне розширення газу:  
 $m = \text{const}$ ;  $p = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U + A$

Якщо газ ідеальний одноатомний, то робота газу дорівнює  $A = p\Delta V$ , а зміна його внутрішньої енергії  $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V$ . Кількість теплоти, передана газу, дорівнює:  $Q = \Delta U + A = \frac{3}{2}p\Delta V + p\Delta V = \frac{5}{2}p\Delta V$ , або  $Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T$ .

### 3 Які особливості має адіабатний процес

**Адіабатний процес** — це процес, який відбувається без теплообміну з навколошнім середовищем.

При адіабатному процесі кількість теплоти  $Q$ , передана системі, дорівнює нулю, тому перший закон термодинаміки має вигляд:

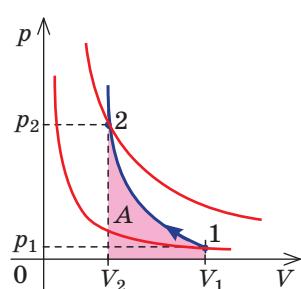
$$\Delta U + A = 0, \text{ або } A = -\Delta U.$$

У ході адіабатного розширення газ виконує додатну роботу за рахунок зменшення внутрішньої енергії, при цьому температура газу зменшується.



Доведіть, що в ході адіабатного стиснення внутрішня енергія і температура газу збільшуються.

Оскільки  $p = nkT$ , у разі адіабатного стиснення тиск газу зростає набагато швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зі збільшенням концентрації молекул газу збільшується і його температура (рис. 38.6). Аналогічно в разі адіабатного розширення тиск падає швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зменшуються і концентрація, і температура газу.



**Рис. 38.6.** Змінення тиску газу в ході адіабатного процесу. Синім кольором показано адіабату, червоним — ізотерму

• **Ізобарний процес** (рис. 38.5). У ході цього процесу виконується робота і змінюється внутрішня енергія газу, тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U + A.$$

При ізобарному процесі передана газу кількість теплоти йде і на збільшення внутрішньої енергії газу, і на виконання механічної роботи.

### 4 Які особливості має адиабатний процес

**Адіабатний процес** — це процес, який відбувається без теплообміну з навколошнім середовищем.

При адіабатному процесі кількість теплоти  $Q$ , передана системі, дорівнює нулю, тому перший закон термодинаміки має вигляд:

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

У ході адіабатного розширення газ виконує додатну роботу за рахунок зменшення внутрішньої енергії, при цьому температура газу зменшується.



Доведіть, що в ході адіабатного стиснення внутрішня енергія і температура газу збільшуються.

Оскільки  $p = nkT$ , у разі адіабатного стиснення тиск газу зростає набагато швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зі збільшенням концентрації молекул газу збільшується і його температура (рис. 38.6). Аналогічно в разі адіабатного розширення тиск падає швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зменшуються і концентрація, і температура газу.

У реальних умовах процес, близький до адіабатного, можна здійснити, якщо газ міститиметься всередині деякої оболонки з дуже хорошими термоізоляційними властивостями. Адіабатними можна вважати й процеси, які відбуваються дуже швидко, тому що в такому випадку газ не встигає обмінятися теплотою з навколошнім середовищем (наприклад, розширення і стиснення повітря в ході поширення звукових хвиль; розширення газу під час вибуху).

Збільшення температури внаслідок різкого стиснення повітря використовується в дизельному двигуні, в якому відсутня система запалювання пальної суміші (див. § 39).

## 4

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** У результаті ізобарного розширення неон виконав роботу 56 Дж. Яку кількість теплоти передано газу? Якою є зміна його внутрішньої енергії? За якого тиску відбувався процес, якщо об'єм газу збільшився на 2,0 л?

$$A = 56 \text{ Дж}$$

$$\Delta V = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$Q = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$p = ?$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Для ізобарного процесу робота газу дорівнює:  $A = p\Delta V$ . Звідси  $p = \frac{A}{\Delta V}$ .

Зміна внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу дорівнює:  $\Delta U = \frac{3}{2} p\Delta V = \frac{3}{2} A$ .

$$\text{Згідно з першим законом термодинаміки: } Q = \Delta U + A \Rightarrow Q = \frac{3}{2} A + A = \frac{5}{2} A.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканих величин:

$$[p] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}; \quad p = \frac{56}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 28 \cdot 10^3 \text{ (Па);}$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 84 \text{ Дж}; \quad Q = \frac{5}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 140 \text{ Дж}.$$

*Відповідь:*  $Q = 140 \text{ Дж}$ ;  $\Delta U = 84 \text{ Дж}$ ;  $p = 28 \text{ кПа}$ .



## Підбиваємо підсумки

• Закон збереження енергії, записаний для теплових процесів, називають першим законом (началом) термодинаміки: кількість теплоти, передана системі, йде на зміну внутрішньої енергії системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил:  $Q = \Delta U + A$ .

• При ізохорному процесі газ не виконує роботу ( $A = 0$ ), тому вся теплота, передана газу, йде на збільшення його внутрішньої енергії:  $Q = \Delta U$ .

• При ізотермічному процесі внутрішня енергія газу не змінюється ( $\Delta U = 0$ ), тому вся теплота, передана газу, йде на виконання газом роботи:  $Q = A$ .

• При ізобарному процесі теплота, передана газу, йде як на збільшення внутрішньої енергії газу, так і на виконання газом роботи:  $Q = \Delta U + A$ .

• При адіабатному процесі газ не одержує теплоти ( $Q = 0$ ), тому збільшення його внутрішньої енергії відбувається за рахунок виконання над газом роботи (адіабатне стиснення):  $\Delta U = A'$ . Якщо ж газ сам виконує роботу (адіабатне розширення), то його внутрішня енергія зменшується:  $A = -\Delta U$ .

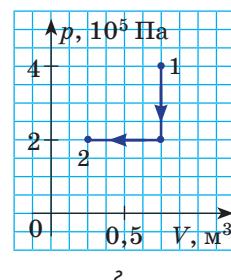
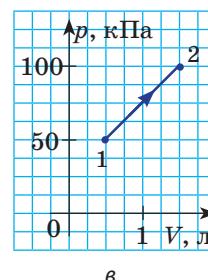
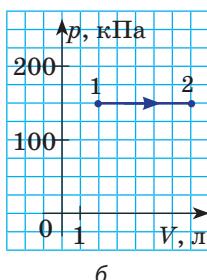
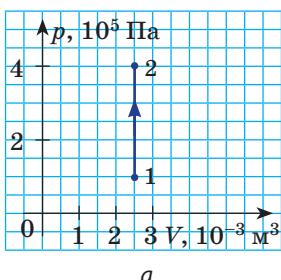


## Контрольні запитання

- Сформулюйте закон збереження та перетворення енергії. Які спостереження підштовхнули Ю. Маєра до відкриття цього закону?
- Сформулюйте перший закон термодинаміки.
- Як буде записаний перший закон термодинаміки для ізохорного процесу? для ізотермічного процесу? для ізобарного процесу?
- Який процес називають адіабатним?
- Запишіть перший закон термодинаміки для адіабатного розширення газу; для адіабатного стиснення газу.
- Чому при адіабатному стисненні тиск газу збільшується набагато швидше, ніж при ізотермічному?

**Вправа № 38**

- При ізохорному охолодженні повітря передало довкіллю 15 Дж теплоти. На скільки змінилася внутрішня енергія повітря? Яку роботу воно виконало?
- У ході ізобарного стиснення гелій віддав довкіллю 6 Дж теплоти. На скільки змінилася внутрішня енергія газу? Яку роботу виконав газ?
- Газ розширяється від об'єму  $V_1$  до об'єму  $V_2$  в одному випадку ізотермічно, в другому — ізобарно, в третьому — адіабатно. У якому випадку газ виконує більшу роботу? газу передається більша кількість теплоти? внутрішня енергія газу зростає на більше значення?
- На рис. а—г наведено графіки процесів, що відбуваються з ідеальним однотомним газом. Яку кількість теплоти передано газу в кожному випадку?
- Температура кисню масою 3,2 кг при ізобарному розширенні збільшилася на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Яку роботу виконав газ? На скільки змінилася внутрішня енергія газу? Питома теплоємність кисню за незмінного тиску дорівнює 913 Дж/(кг·К).
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, яке відношення має перший закон термодинаміки до утворення хмар.



## § 39. ПРИНЦІП ДІЇ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ. ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА



Протягом тисячоліть використовувалися механізми, які суттєво полегшували фізичні навантаження на людину. Однак до кінця XVIII ст. величезний запас енергії, що міститься всередині різних видів палива, був практично не затребуваний. І тільки завдяки відкриттям, зробленим у термодинаміці, з'явилися *теплові машини* — пристрої, які *перетворюють внутрішню енергію на механічну роботу*. Про теплові машини, їх будову, фізичні закони, на яких ґрунтуються їх дія, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Необоротність процесів у природі

Уявіть: ви внесли в будинок грудочку снігу, поклали її на стіл і, природно, через деякий час замість снігу виявили калюжку води. І раптом на ваших очах у воді з'являється крижинка, яка поступово збільшується, — і невдовзі замість калюжки ви бачите гірку пухнастого снігу. «Це неможливо!», — скажете ви і матимете рацію, адже знаєте, що в теплій кімнаті сніг завжди перетворюється на воду, але вода ніколи *самочинно* не перетвориться на сніг.

Інший приклад. Піднімаючись на гору, ви наступаєте на камінь, він зривається, котиться схилом і, прокотившись певну відстань, зупиняється. При цьому механічна енергія каменя перетворюється на внутрішню енергію самого каменя, схилу та оточуючого повітря. Із точки зору закону збереження енергії можливий і зворотний процес, коли камінь котитиметься вгору за рахунок накопиченої в ньому та довкіллі внутрішньої енергії. Однак на практиці такий процес не спостерігається.

Ці два приклади та безліч інших подібних переконують: *у природі всі макроскопічні процеси мають певний напрямок і в зворотному напрямку вони самочинно відбуватися не можуть.*

Процеси, які можуть самочинно відбуватися тільки в одному напрямку, називають **необоротними процесами**.

Необоротність процесів у природі відображає **другий закон (начало) термодинаміки**, який має кілька еквівалентних формуллювань. Наприклад, у формулюванні німецького фізика та математика **Рудольфа Клаузіуса** він звучить так:

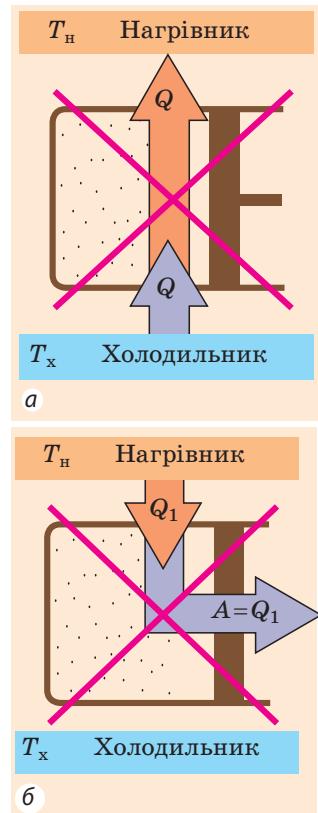
**Неможливим є процес, єдиний результат якого — передача енергії у формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого** (рис. 39.1, а).

Зверніть увагу на слова «єдиний результат». Тепло довільно передається тільки від більш нагрітого тіла до менш нагрітого, при цьому з іншими тілами жодних змін не відбувається. Зворотний процес теж можливий, але результат *не буде єдиним*. Наприклад, у холодильному пристрої тепло передається від менш нагрітої холодильної камери до теплішого навколошнього повітря, але при цьому витрачається електрична енергія.

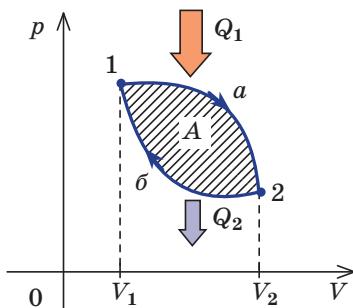
Англійський фізик **Вільям Томсон (лорд Кельвін)** дав у 1851 р. таке формулювання **другого закону (начала) термодинаміки**:

**Неможливим є періодичний процес, єдиний результат якого — виконання тілом механічної роботи за рахунок зменшення його внутрішньої енергії** (рис. 39.1, б).

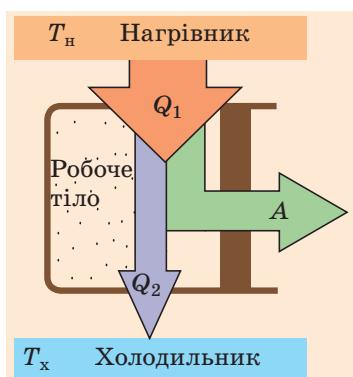
Якби такий процес був можливим, то ми одержали б *вічний двигун другого роду*. Така машина, наприклад, могла б відбирати теплову енергію у Світового океану та повністю перетворювати її на роботу.



**Рис. 39.1.** Циклічні процеси, «дозволені» першим законом термодинаміки, але «заборонені» другим законом: а — ідеальна холодильна машина; б — вічний двигун другого роду



**Рис. 39.2.** У ході циклічного процесу газ повертається у вихідний стан. Якщо розширення газу (ділянка 1a2) відбувається за більшого тиску, ніж стиснення (ділянка 2a1), то сумарна робота за цикл є додатною (ця робота відповідає площі фігури 1a2a1)



**Рис. 39.3.** Принцип роботи теплових двигунів: робоче тіло, одержуючи певну кількість теплоти  $Q_1$  від нагрівника, виконує механічну роботу  $A$  і передає деяку кількість теплоти  $Q_2$  холодильнику

У тепловому двигуні відбувається циклічний періодичний процес, у результаті якого за рахунок зменшення внутрішньої енергії нагрівника виконується механічна робота. Однак цей результат не єдиний, тому що частина енергії передається холодильнику.

### 2 Із яких основних частин складається тепловий двигун

Процеси, які не суперечать ані першому, ані другому законам термодинаміки, відбуваються в теплових машинах. Як приклад розглянемо роботу *теплового двигуна*.

**Тепловий двигун** — теплова машина циклічної дії, яка енергію, що виділяється під час згоряння палива, перетворює на механічну роботу.

Механічну роботу у двигуні виконує газ, який, розширюючись, тисне на поршень. Газ, який виконує механічну роботу в процесі свого розширення, називають *робочим тілом*.

Щоб газ міг штовхати поршень, необхідно, щоб тиск під поршнем був більшим за зовнішній тиск. Таке підвищення тиску досягається за рахунок збільшення температури робочого тіла. Пристрій, у контакті з яким робоче тіло одержує певну кількість теплоти, називають *нагрівником*.

Робоче тіло не може нескінченно розширюватися. Для безперервної роботи двигуна необхідно, щоб поршень повертається у початкове положення. Газ при цьому буде стискатися, виконуючи від'ємну роботу. Щоб у цілому за цикл робота газу була додатною, тиск, а отже, і температура газу під час стиснення мають бути меншими, ніж тиск і температура під час розширення (рис. 39.2), тобто газ потрібно охолоджувати. Об'єкт, у контакті з яким від робочого тіла береться деяка кількість теплоти, називають *холодильником*.

Будь-який тепловий двигун складається з трьох основних частин: *нагрівника*, *робочого тіла*, *холодильника* (рис. 39.3).

### 3 Чи може ККД теплової машини дорівнювати 100 %

Внутрішня енергія робочого тіла за цикл не змінюється (внутрішня енергія — функція стану, а після закінчення циклу газ повертається у вихідний стан), тому згідно з першим законом термодинаміки робота  $A$ , яку виконує газ за цикл, дорівнює:  $A = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, одержаної газом від нагрівника, а  $Q_2$  — кількість теплоти, відданої газом холодильнику.

жана від нагрівника;  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана холодильнику. Чим менше тепла віддається холодильнику (втрачається), тим більшим є ККД теплового двигуна.

**Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  двигуна** — фізична величина, яка характеризує економічність теплового двигуна і дорівнює відношенню роботи, виконуваної двигуном за цикл, до кількості теплоти, одержуваної від нагрівника:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}; \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

*Зверніть увагу!* 1. Якщо в тепловому двигуні згоряє паливо, то  $Q_1 = qm$ , де  $q$  — питома теплота згоряння палива,  $m$  — маса палива. 2. ККД теплового двигуна завжди менший від одиниці.

Аналізуючи роботу теплових двигунів, французький інженер *Саді Карно* (1796–1832) у 1824 р. дійшов висновку, що найбільш ефективним (із максимально можливим ККД  $\eta_{\max}$ ) є так званий *ідеальний тепловий двигун*, який працює за циклом, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатичних процесів (рис. 39.4). Карно довів, що ККД такого двигуна дорівнює:

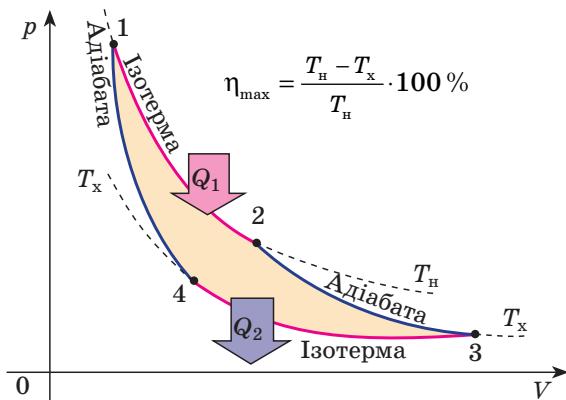
$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_x}{T_h},$$

де  $T_h$  — температура нагрівника;  $T_x$  — температура холодильника.

**Другий закон (начало) термодинаміки** у формулуванні *С. Карно*:

Будь-яка реальна теплова машина, що працює з нагрівником, який має температуру  $T_h$ , і холодильником із температурою  $T_x$ , не може мати ККД, який перевищує ККД ідеальної теплової машини.

Формулування Карно показує, що для збільшення ККД теплового двигуна потрібно зменшити температуру холодильника і (або) збільшити температуру нагрівника. Однак температуру холодильника не можна зменшити до нижчої, ніж температура довкілля, а температура нагрівника обмежена жаростійкістю матеріалів, з яких виготовлені поршень і циліндр двигуна. Тому максимальний ККД не може перевищувати 60–70 %. Зараз основні зусилля інженерів спрямовані на збільшення реального ККД за рахунок зменшення втрат енергії під час тертя і втрат палива внаслідок неповного його згоряння.

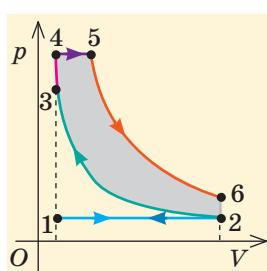


**Рис. 39.4.** Цикл Карно: 1–2 — ізотермічне розширення за температури  $T_h$ , робоче тіло одержує теплоту  $Q_1$ ; 2–3 — адіабатне розширення, зменшення температури до  $T_x$ , теплообміну немає; 3–4 — ізотермічне стиснення за температури  $T_x$ , робоче тіло віддає теплоту  $Q_2$ ; 4–1 — адіабатне стиснення, збільшення температури до  $T_h$

## 4

## Як працюють дизельні двигуни

Сучасну цивілізацію неможливо уявити без теплових двигунів. Найбільш широко їх використовують у теплових та атомних електростанціях, де потужні парові турбіни (двигуни зовнішнього згоряння) обертають ротори генераторів електричного струму. Теплові двигуни використовують і в більшості сучасних видів транспорту. На потужних літаках і ракетах встановлюють турбореактивні та реактивні двигуни, на легких літаках — поршневі. Водні судна можуть бути оснащені як дизельними двигунами (двигунами внутрішнього згоряння), так і турбінами. Карбюраторні та дизельні двигуни приводять у рух більшість сучасних автомобілів.



У курсі фізики 8 класу ви ознайомилися з роботою карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння. Розглянемо, як працює *дизельний двигун*.

На відміну від карбюраторного двигуна (в якому пальна суміш утворюється ззовні циліндра та запалюється від електричної іскри), в дизельних двигунах пальна суміш утворюється безпосередньо всередині циліндра, а запалюється внаслідок підвищення температури повітря під час стиснення (рис. 39.5).

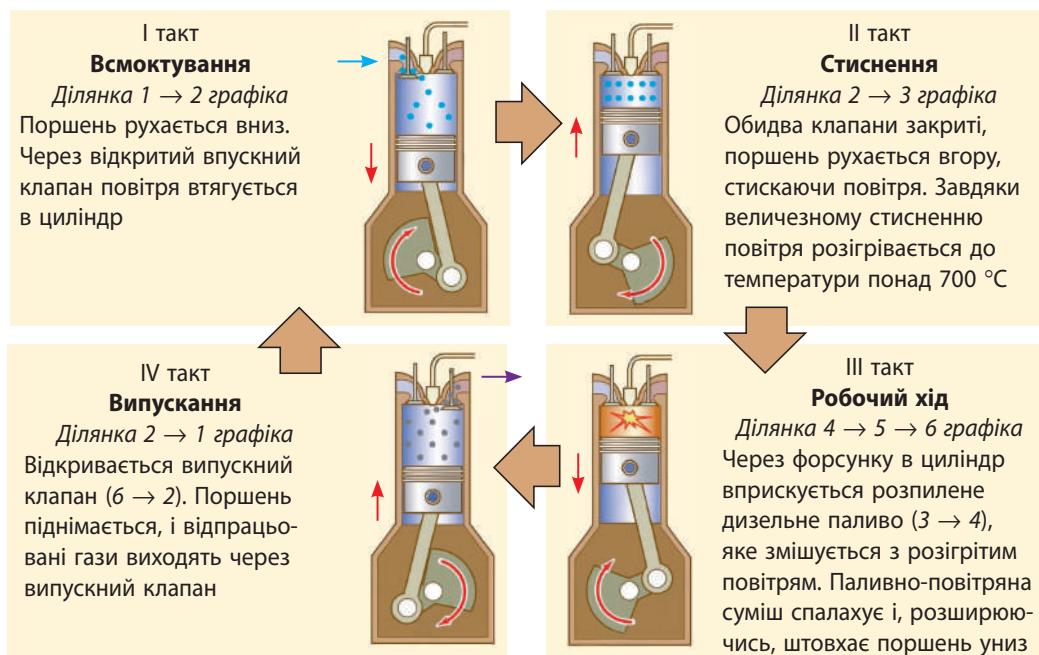


Рис. 39.5. Графік циклу і принцип роботи чотиритактного дизельного двигуна

Незважаючи на зручність і користь, теплові двигуни забруднюють навколоінше середовище (насамперед це викиди шкідливих речовин, теплове забруднення). На жаль, зараз людство не може відмовитися від використання теплових двигунів, тому пов'язані з цим екологічні проблеми потрібно вирішувати.



Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, які міжнародні програми щодо захисту навколоіншого середовища реалізуються зараз.

## 5

## Як працює холодильний пристрій

**Холодильний пристрій** — це пристрій циклічної дії, який підтримує в холодильній камері температуру нижчу, ніж температура довкілля.

Принцип роботи холодильного пристрію показано на [рис. 39.6](#).

Робочим тілом у холодильному пристрії є **холодоагент** — пара рідини, яка легко випаровується. Унаслідок стиснення холодоагент конденсується, при цьому виділяється велика кількість теплоти  $Q_1$ , яка через теплообмінник передається довкіллю. Стиснення газу здійснюється **компресором**, який виконує механічну роботу  $A'$  за рахунок електроенергії.

У випарнику тиск над поверхнею рідини зменшується, холодоагент випаровується, при цьому поглинається кількість теплоти  $Q_2$ . Оскільки стиснення робочого тіла відбувається за більшого тиску, ніж його розширення, то робота газу за цикл є від'ємною і дорівнює:

$$A = Q_2 - Q_1.$$

Зовнішні сили за цикл виконують додатну роботу:  $A' = Q_1 - Q_2$ .

Фізична величина, яка характеризує ефективність роботи холодильного пристрію і дорівнює відношенню кількості теплоти, забраної за цикл від холодильної камери, до роботи зовнішніх сил, називається **холодильним коефіцієнтом пристрію**:

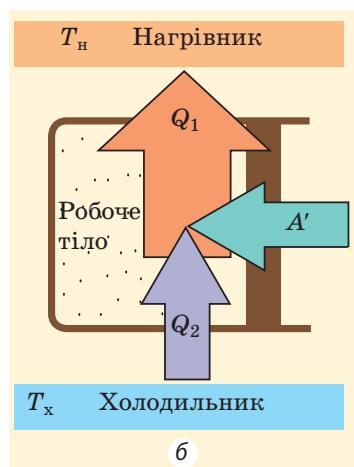
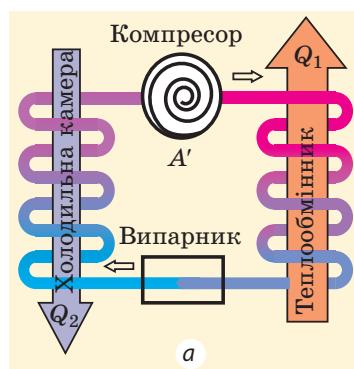
$$k = \frac{Q_2}{A'}; \quad k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Із другого закону термодинаміки випливає, що **максимальний холодильний коефіцієнт пристрію** дорівнює:  $k_{\max} = \frac{T_x}{T_h - T_x}$

**Зверніть увагу:** холодильний коефіцієнт пристрію може бути більшим за одиницю (на відміну від ККД теплового двигуна).

Якщо трубки теплообмінника винести за межі приміщення, а холодильну камеру залишити відчиненою, то холодильний пристрій забиратиме тепло з приміщення та віддаватиме його довкіллю. Так працює **кондиціонер** — електричний пристрій, призначений для охолодження повітря в приміщенні.

Якщо трубки теплообмінника залишити в приміщенні, а відчинену холодильну камеру винести за його межі, то холодильний пристрій



**Рис. 39.6.** Будова (а) і принцип роботи (б) холодильного пристрію: робоче тіло розширяється і виконує роботу, одержуючи кількість теплоти  $Q_2$  від холодильної камери. За рахунок роботи  $A'$  зовнішніх сил робоче тіло стискається, при цьому довкіллю передається кількість теплоти  $Q_1 = Q_2 + A'$

забиратиме тепло з довкілля і віддаватиме його приміщеню. Так працює *тепловий насос* — пристрій для обігріву приміщення. Цікаво, що тепловий насос працює ефективніше за звичайний електричний обігрівач, бо в ході його роботи передана приміщеню кількість теплоти ( $Q_2 = A' + Q_1$ ) більша, ніж робота  $A'$  електричного струму. Сучасні кондиціонери мають два режими роботи: влітку вони працюють як кондиціонери, взимку — як теплові насоси.



### Підбиваємо підсумки

- Усі макроскопічні процеси в природі мають певний напрямок, і в зворотному напрямку вони довільно відбуватися не можуть. Процеси, які можуть самочинно відбуватися тільки в одному напрямку, називають необоротними. Необоротність процесів у природі відбуває другий закон (начало) термодинаміки, який можна сформулювати так: неможливим є періодичний процес, єдиний результат якого — виконання тілом механічної роботи за рахунок зменшення його внутрішньої енергії.
- Тепловий двигун — теплова машина циклічної дії, яка енергію, що виділяється при згорянні палива, перетворює на механічну роботу. Будь-який тепловий двигун має три частини: нагрівник, робоче тіло, холодильник.

- ККД теплового двигуна визначають за формулою  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ ; він

не може перевищувати ККД ідеальної теплової машини:  $\eta_{\max} = \frac{T_h - T_x}{T_h}$ .

- Холодильний пристрій — пристрій циклічної дії, який підтримує в холодильній камері температуру нижчу, ніж температура довкілля.

### Контрольні запитання



1. Наведіть приклади природних процесів і доведіть, що вони є необоротними.
2. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
3. Наведіть приклади умовних процесів, які не суперечать першому началу термодинаміки, але суперечать другому.
4. Дайте означення теплового двигуна. Які його основні елементи?
5. Як визначити ККД теплового двигуна? Які існують можливості збільшення ККД?
6. Як визначити ККД циклу Карно?
7. Як працює холодильний пристрій? Наведіть приклади різних холодильних пристрій. У чому їх відмінність?
8. Що показує холодильний коефіцієнт?



### Вправа № 39

1. Чи можна, відчинивши дверцята працюючого холодильника, охолодити повітря в кімнаті?
2. Теплова машина працює за циклом Карно. Визначте ККД машини, якщо температура нагрівника за шкалою Кельвіна більша, ніж температура холодильника: а) у 2 рази, б) у 3 рази, г) у  $n$  разів.
3. Кількість теплоти, яку робоче тіло одержує від нагрівника, становить за цикл 240 Дж, а яку віддає холодильнику — 150 Дж. Визначте ККД двигуна та виконувану ним роботу.
4. У тепловій машині потужністю 1,0 кВт, яка працює за циклом Карно, нагрівником є вода, узята за температури кипіння, а холодильником — лід, що тане. Яка маса льоду тане під час роботи машини протягом хвилини? Питома теплота плавлення льоду — 330 кДж/кг.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ III «МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА». Частина 2. Основи термодинаміки

1. Ви дізналися, що в основі термодинаміки лежить поняття *внутрішньої енергії*.

**Внутрішня енергія  $U$**  — сума кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини і потенціальної енергії їх взаємодії

## Способи зміни внутрішньої енергії

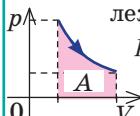
### Теплопередача

*Кількість теплоти:*

- нагрівання/охолодження речовини:  $Q = cm\Delta T = C\Delta T$
- плавлення/кристалізація речовини:  $Q = \lambda m$
- пароутворення/конденсація речовини:  $Q = Lm$ ,  $Q = rm$

### Робота

Чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності



**Внутрішня енергія ідеального одноатомного газу**

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV$$

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

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

2. Ви ознайомились із законом збереження та перетворення енергії в термодинаміці.

**Перший закон термодинаміки:**  $Q = \Delta U + A$

Адіабатний процес:  
 $Q = 0$ ,  
 $A = -\Delta U$

Ізотермічний процес:  
 $\Delta U = 0$ ,  
 $Q = A$

Ізобарний процес:  
 $Q = \Delta U + A$ ,  
 $Q = \Delta U + p\Delta V$

Ізохорний процес:  
 $A = 0$ ,  
 $Q = \Delta U$

3. Ви згадали *принцип дії теплових двигунів*:



4. Ви довідалися про *принцип роботи холодильного пристроя*:



5. Ви з'ясували, чому ККД теплової машини завжди менший від 100 %, дізналися, як розрахувати ККД  $\eta$  і визначити холодильний коефіцієнт  $k$ .

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_x}{T_h}$$

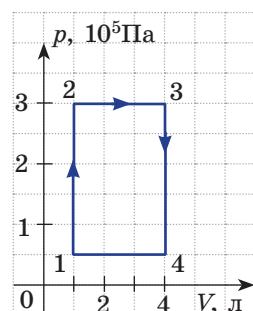
$$k = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$k_{\max} = \frac{T_x}{T_h - T_x}$$

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ III «МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА».

## Частина 2. Основи термодинаміки

Завдання 1–4 містять тільки одну правильну відповідь.



Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть цю суму на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



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

# РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



## § 40. АБЕТКА ЕЛЕКТРОСТАТИКИ



Усі види сил пружності й тертя мають електромагнітну природу; життєдіяльність рослин, організмів тварин і людей базується на електромагнітних взаємодіях. Вивчає цю взаємодію **електродинаміка** — наука про властивості електромагнітного поля, через яке здійснюється взаємодія електрично заряджених тіл або частинок. Якщо електрично заряджені тіла або частинки перебувають у спокої, їх взаємодія розглядається в розділі електродинаміки, який називають **електростатикою**. З основами електростатики ви ознайомились у курсі фізики 8 класу. А от щоб іти далі, необхідно згадати базові поняття.

**1**

### Що таке електричний заряд

Електричний заряд  $q$  — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок або тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

Одніця електричного заряду в СІ — **кулон**:  $[q]=1$  Кл (С).

1 кулон дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 секунду, якщо сила струму в провіднику становить 1 ампер:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} \quad (1 \text{ С} = 1 \text{ А} \cdot \text{s}).$$

#### Основні властивості електричного заряду

1. Існують два роди електричних зарядів — **позитивні** й **негативні**. Електричний заряд такого роду, як заряд, отриманий на бурштині або еbonітовій паличці, потертих об вовну, прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці зі скла, потертий об шовк, — позитивним.

2. Тіла, що мають заряди одного знака, *відштовхуються*; тіла, що мають заряди протилежних знаків, *притягуються*.

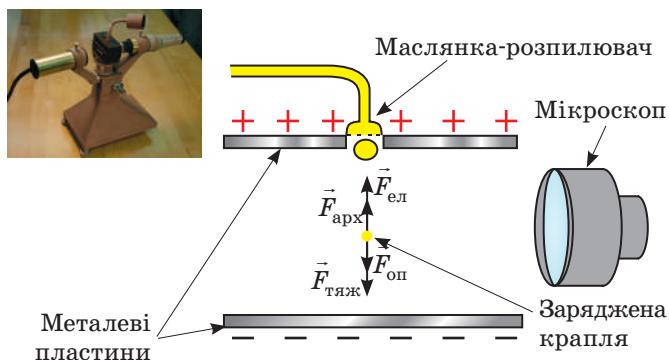
3. *Носієм* електричного заряду є частинка — електричний заряд не існує окремо від нії.

4. Електричний заряд є *дискретним*, тобто електричні заряди фізичних тіл кратні певному найменшому (елементарному) заряду. *Носій найменшого негативного заряду* — **електрон**. Цей заряд зазвичай позначають символом  $e$ ; його значення:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. *Носій найменшого позитивного заряду* — **протон**. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона. Якщо  $q$  — заряд тіла,  $e$  — заряд електрона,  $N$  — ціле число, то  $|q| = N|e|$ .

**2**

### Як був виміряний заряд електрона

Перше досить точне вимірювання елементарного заряду здійснив американський фізик-експериментатор *Роберт Ендрус Міллікен* (1868–1953) на початку ХХ ст. Схему його досліду подано на [рис. 40.1](#). У простір між зарядженими пластинами, заряд на яких можна було плавно змінювати,



**Рис. 40.1.** Пристрій для досліду і схема досліду Р. Міллікена щодо визначення заряду електрона. На краплю, що потрапляє між пластинами, діють сила тяжіння ( $\vec{F}_{\text{так}}$ ), сила опору повітря ( $\vec{F}_{\text{оп}}$ ), архімедова сила ( $\vec{F}_{\text{арх}}$ ) і сила з боку електричного поля заряджених пластин ( $\vec{F}_{\text{ел}}$ )

вчений впорскував масло. При впорскуванні утворювалися дуже маленькі крапельки, частина з яких несла негативний заряд.

Кожного разу Міллікен спостерігав за окремою зарядженою краплею. Плавно змінюючи заряд пластин, учений домагався, щоб крапля рівномірно піднімалася вгору. Зрозуміло, що в цьому випадку сили, які діяли на краплю, були скомпенсовані. Ураховуючи це, а також те, що сила  $\vec{F}_{\text{ел}}$ , яка діяла на краплю з боку пластин, прямо пропорційна заряду краплі, вчений обчислював заряд краплі.

Багато разів повторюючи вимірювання (історики стверджують, що досліди тривали майже 4 роки), Міллікен з'ясував, що кожного разу заряд  $q$  краплі був кратним деякому найменшому заряду:  $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Тобто  $q = Ne$ , де  $N$  — ціле число.

Досліджувані краплі були заряджені негативно, тобто мали надлишкову кількість електронів. Тому вчений зробив висновок, що найменший заряд — це заряд електрона.

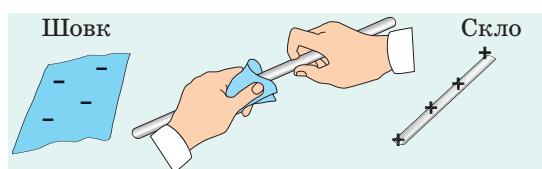
Важливий результат роботи Міллікена — не тільки визначення заряду електрона, а й доведення дискретності електричного заряду.

### 3

### Що відбувається під час електризації

Електризація — це процес одержання електричного заряду макроскопічними тілами або їх частинами.

Є кілька способів електризації, серед них — *електризація тертям (трибоелектрика)*. Ви вже знаєте, що в процесі електризації тертям відбувається тісний контакт двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, і частина електронів переходить з одного тіла на інше. Після роз'єднання тіл виявляється, що тіло, яке віддало частину своїх електронів, заряджене *позитивно*, а тіло, яке одержало ці електрони, заряджене *негативно* (рис. 40.2).



**Рис. 40.2.** Під час електризації тертям частина електронів зі скляної палички перейде на клаптик шовку, в результаті чого скляна паличка набуде позитивного заряду, а клаптик шовку — негативного

За будь-якого способу електризації тіл відбувається *перерозподіл* наявних в них електричних зарядів, а не появі нових. Це твердження є наслідком одного з найважливіших законів природи — **закону збереження електричного заряду**:

Повний заряд електрично замкненої системи тіл залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в цій системі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряди тіл, які утворюють систему;  $n$  — кількість тіл.

Таким чином, якщо перед електризацією тертям скляної палички об шовкову тканину і паличка, і тканина були незарядженими, то після тертя вони виявляються зарядженими, причому їхні заряди будуть однаковими за модулем і протилежними за знаком. Тобто їхній сумарний заряд, як і перед дослідом, дорівнюватиме нулю.

#### 4 Що визначає закон Кулона

Французький фізик *Шарль Кулон* (1736–1806) експериментально встановив закон, який став *основним законом електростатики* і був названий на його честь, — **закон Кулона**:

Сила  $F$  взаємодії двох нерухомих точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$  прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані  $r$  між ними:

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

де  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коефіцієнт пропорційності. Нагадаємо: **точковий заряд** — це фізична модель зарядженого тіла, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

**Коефіцієнт пропорційності**  $k$  чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл кожний, розташовані у *вакуумі* на відстані 1 м один від одного.

Іноді замість коефіцієнта  $k$  застосовують *інший коефіцієнт* —  $\epsilon_0$ , що має назву

**електрична стала**:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

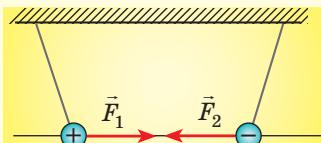
Тоді математичний запис закону Кулона має такий вигляд:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ .

#### Зверніть увагу!

- У законі Кулона йдеться про добуток *модулів* зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили.

- Сили, з якими взаємодіють точкові заряди, зазвичай називають *кулонівськими силами*.

- Кулонівські сили *напрямлені вздовж прямої*, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють.



- Якщо треба визначити силу взаємодії зарядів у випадку, коли взаємодіють три заряди чи більше, спочатку визначають сили взаємодії певного заряду з кожним із решти зарядів, а потім розраховують їхню результатуючу.

- Якщо заряди перемістити з вакууму в діелектрик, то сила їхньої взаємодії зменшиться в  $\epsilon$  разів, де  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика (див. § 43).

## 5

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** На прямій, яка з'єднує позитивний заряд  $q_1$  і негативний заряд  $q_2$ , кожен із яких дорівнює за модулем  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл, розташований заряд  $q_3 = -1 \cdot 10^{-8}$  Кл. Відстань  $r_1$  між зарядами  $q_1$  і  $q_3$  дорівнює 6 см, відстань  $r_2$  між зарядами  $q_2$  і  $q_3$  дорівнює 3 см. Обчисліть силу, яка діє на заряд  $q_3$ , якщо він розташований між зарядами  $q_1$  і  $q_2$ .

Дано:

$$|q_1| = |q_2| = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$|q_3| = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

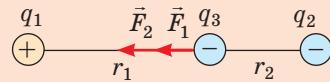
$$\bar{F} = ?$$

## Аналіз фізичної проблеми, розв'язання

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому покажемо сили

$\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які діють на заряд  $q_3$

з боку зарядів  $q_1$  і  $q_2$ .



Як видно з рисунка, модуль рівнодійної сили  $\vec{F}$ , з якою

заряди  $q_1$  і  $q_2$  діють на заряд  $q_3$ , дорівнює:  $F = F_1 + F_2$ .

За законом Кулона:  $F_1 = k \frac{|q_1||q_3|}{r_1^2}$ ;  $F_2 = k \frac{|q_2||q_3|}{r_2^2}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:  $[F] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = \text{Н}$ ;

$$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)}; F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)};$$

$$F = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н} + 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н} = 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н.}$$

Відповідь:  $F = 62,5$  мН.

## Контрольні запитання



- Що називають електричним зарядом?
- Назвіть одиницю електричного заряду.
- Які роди зарядів існують?
- Як взаємодіють тіла, що мають заряди одного знака? протилежних знаків?
- Яка частинка має найменший негативний заряд? найменший позитивний заряд?
- Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?
- Хто і як першим вимірював заряд електрона?
- Якщо електронейтральне тіло віддасть частину своїх електронів, заряд якого знака воно матиме?
- Чому під час електризації тертям електризуються обидва тіла?
- Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
- Сформулюйте закон Кулона.

## Вправа № 40



- Як поводиться ваше волосся відразу після того, як ви стягнули через голову светр, виготовлений, наприклад, з акрилу? Чому?
- Як зміниться сила взаємодії двох зарядів, якщо відстань між ними збільшиться в 4 рази, а модуль кожного заряду збільшиться в 2 рази?
- Дві однакові маленькі металеві кульки заряджені так, що модуль заряду однієї з них у 5 разів більший, ніж модуль заряду іншої. Кульки змусили торкнутись одної і розвели на початкову відстань. У скільки разів змінилася сила взаємодії кульок, якщо перед дотиком вони були заряджені одноїменно?
- На шовковій нитці підвісили маленьку кульку, яка має заряд  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл і масу 2 г. Після того як знизу до неї піднесли другу заряджену кульку, сила натягу нитки, що діє на першу кульку, збільшилась у 2 рази. Визначте відстань між кульками, якщо їхня заряди рівні за модулем.



## § 41. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



Майкл Фарадей  
(1791–1867)

Яким є механізм взаємодії зарядів? Яким чином заряди «відчувають» один одного і взаємодіють на відстані? Пошук відповідей на ці та багато інших запитань привів англійського фізика Майкла Фарадея до ідеї поля, яку Альберт Ейнштейн пізніше назвав найважливішим відкриттям із часів Ньютона. У курсі фізики ви вже зустрічалися з поняттям поля, а зараз ознайомитеся з ним детальніше.

1

### Що називають електричним полем

Згідно з ідеєю М. Фарадея електричні заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний заряд створює у навколошньому просторі електричне поле, і взаємодія зарядів відбувається через іхні поля. Наприклад, взаємодія двох електричних зарядів  $q_1$  і  $q_2$  зводиться до того, що електричне поле заряду  $q_1$  діє на заряд  $q_2$ , а поле заряду  $q_2$  діє на заряд  $q_1$ .

Електричне поле поширюється в просторі з величезною, але скінченною швидкістю, — зі швидкістю поширення світла. Завдяки цій властивості взаємодія між двома зарядами починається не миттєво, а через певний інтервал часу  $\Delta t$ . Таке запізнення взаємодії важко виявити на відстанях у декілька метрів, але в космічних масштабах воно є досить помітним.

Людина не може безпосередньо, за допомогою органів чуття, сприймати електричне поле, проте його матеріальність, тобто об'єктивність існування, доведено експериментально.

**Електричне поле** — форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

Електричне поле є складовою єдиного електромагнітного поля. Джерелами електричного поля можуть бути рухомі й нерухомі електричні заряди та змінні магнітні поля.

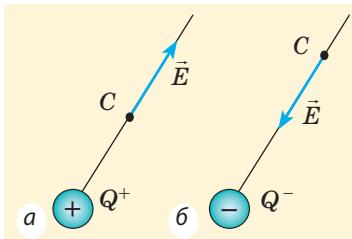
Електричне поле, створене тільки нерухомими зарядами, є незмінним у часі (*статичним*). Таке поле називають **електростатичним**.

2

### Що вважають силовою характеристикою електричного поля

Електричне поле, що оточує заряджене тіло, можна досліджувати за допомогою *пробного заряду*. Зрозуміло, що він не має змінювати досліджуване поле, тому як пробний заряд доцільно використовувати невеликий за значенням *точковий заряд*.

Отже, для вивчення електричного поля в деякій точці слід у цю точку помістити пробний заряд  $q$  і виміряти силу  $\vec{F}$ , яка на нього діє. Очевидно, що в точці, де на заряд діє більша сила, електричне поле є сильнішим. Однак сила, яка діє на пробний заряд в електричному полі, залежить від цього заряду. А от відношення  $\frac{\vec{F}}{q}$  від заряду не залежить, тож це відношення можна розглядати як *силову характеристику поля*.



**Рис. 41.1.** Визначення напрямку вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля в деякій точці  $C$ : поле створено позитивним точковим зарядом  $Q^+$  (а); негативним точковим зарядом  $Q^-$  (б)

### Зверніть увагу!

Формула  $E = k \frac{|Q|}{r^2}$  справдіється й для напруженості поля рівномірно зарядженої сфери на відстанях, що більші за її радіус або дорівнюють їйому, адже поле сфери поза сферою і на її поверхні збігається з полем точкового заряду, поміщеного в центр сфери.

Напруженість електричного поля  $\vec{E}$  в даній точці — векторна фізична величина, яка характеризує електричне поле й дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , з якою електричне поле діє на пробний заряд, поміщений у цю точку поля, до значення  $q$  цього заряду:

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

За напрямок вектора напруженості в даній точці електричного поля беруть напрямок сили, яка діяла б на пробний позитивний заряд, якби він був поміщений у цю точку поля (рис. 41.1).

Формула  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  дозволяє визначити одиницю напруженості електричного поля:

$$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right).$$

Нехай точковим зарядом  $Q$  у вакуумі створено електричне поле. Дослідимо це поле за допомогою пробного заряду  $q$ , розташованого на відстані  $r$  від заряду  $Q$ . З боку поля на пробний заряд  $q$  діє сила Кулона:  $F = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2}$ .

Оскільки модуль напруженості  $E = \frac{F}{|q|}$ ,

$$\text{маємо: } E = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2 |q|} = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Отже, модуль напруженості  $\vec{E}$  електричного поля, створеного точковим зарядом  $Q$  на відстані  $r$  від цього заряду, обчислюють за формулою:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}, \text{ або } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{r^2}.$$

### 3 У чому суть принципу суперпозиції полів

Знаючи напруженість  $\vec{E}$  електричного поля, створеного деяким зарядом у даній точці простору, неважко визначити модуль і напрямок вектора сили, з якою поле діятиме на будь-який заряд  $q$ , поміщений у цю точку:

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

Якщо ж поле утворено кількома зарядами, то результуюча сила, яка діє на пробний заряд із боку системи зарядів, визначається геометричною сумаюю сил, з якими діють ці заряди на даний пробний заряд:

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

Звідси випливає принцип суперпозиції (накладання) електричних полів:

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створюються цими зарядами в даній точці (рис. 41.2):

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

#### 4 Як зробити видимим розподіл поля в просторі

Електричне поле можна зобразити *графічно*, використавши *лінії напруженості електричного поля (силові лінії)*, — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля (рис. 41.3).

Силові лінії електричного поля мають *загальні властивості* (це випливає з їх означення): вони не перетинаються; не мають зламів; починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних.

Дуже просто побудувати силові лінії поля, створеного відокремленим точковим зарядом (рис. 41.4). Такі «родини» силових ліній полів точкових зарядів демонструють, що заряди є джерелами поля.

На підставі картини силових ліній можна дійти висновку не тільки про напрямок вектора напруженості  $\vec{E}$ , але й про його модуль. Справді, для точкових зарядів напруженість поля більшає в міру наближення до заряду, і, як видно з рис. 41.4, силові лінії при цьому згущуються.

Якщо відстань між лініями напруженості в деякій області простору є однаковою, то однаковою є і напруженість поля в цій області. Електричне поле, вектори напруженості якого однакові в усіх точках простору, називають *однорідним*.

Побудувати точну картину силових ліній електричного поля, створеного будь-яким зарядженим тілом, досить важко, саме тому зазвичай обмежуються наближенним зображенням картини, керуючись певною симетрією в розташуванні зарядів (рис. 41.5).

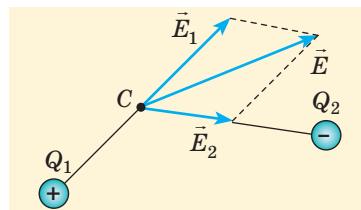


Рис. 41.2. Визначення напруженості електричного поля в точці  $C$ . Поле створене двома точковими зарядами  $Q_1$  і  $Q_2$

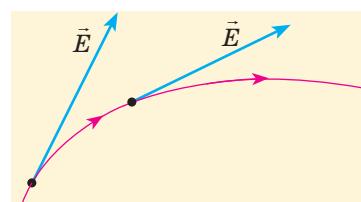


Рис. 41.3. Силова лінія електричного поля (на рисунку зображена червоним)

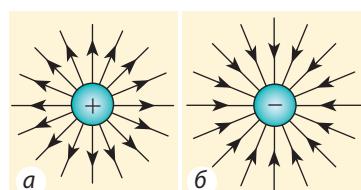


Рис. 41.4. Силові лінії електричного поля, створеного точковим зарядом: а — позитивним; б — негативним

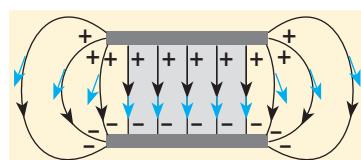


Рис. 41.5. Картина силових ліній електричного поля, створеного системою двох пластин, заряди яких рівні за модулем і протилежні за знаком. Синім позначено напрямки векторів напруженості

Зверніть увагу на картину силових ліній поля, створеного системою двох різномінно заряджених пластин (див. рис. 41.5): в області простору між пластинами, розташованій порівняно далеко від країв пластин (на рисунку ця область зафарбована), лінії напруженості паралельні й відстані між ними однакові, тобто поле в цій області є однорідним.



### Підбиваємо підсумки

- Електричне поле — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

- Силова характеристика електричного поля — напруженість  $\vec{E}$ :  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створюються цими зарядами системи в даній точці:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$ .

- Для графічного зображення полів використовують лінії напруженості електричного поля (силові лінії), — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля.

### Контрольні запитання

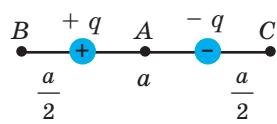


1. Що називають електричним полем? 2. Які об'єкти створюють електричне поле? 3. Що є силовою характеристикою електричного поля? За якою формулою її розраховують? 4. Як визначити напруженість поля, створеного точковим зарядом  $Q$ ? 5. У чому полягає принцип суперпозиції полів? 6. Що називають лінією напруженості електричного поля? 7. Чи можуть лінії напруженості електричного поля перетинатися? бути паралельними?

### Вправа № 41



1. З якою силою електричне поле напруженістю  $250 \text{ Н/Кл}$  діє на заряд  $40 \text{ нКл}$ ?
2. Точковий електричний заряд  $8 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$  розташований у деякій точці електричного поля. Визначте напруженість електричного поля в цій точці, якщо відомо, що поле діє на заряд із силою  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ .
3. Як рухатиметься електрон, що влетів в однорідне електричне поле: а) в напрямку, протилежному напрямку силових ліній? б) перпендикулярно до напрямку силових ліній? Як рухатиметься в таких випадках протон?
4. Напруженість поля точкового заряду на відстані  $30 \text{ см}$  від цього заряду —  $600 \text{ Н/Кл}$ . Чому дорівнює напруженість поля на відстані  $10 \text{ см}$  від заряду?
5. У вершинах квадрата зі стороною  $a$  розташовані однакові за модулем точкові заряди  $q$ . Визначте напруженість поля в центрі квадрата, якщо: а) всі заряди позитивні; б) один із зарядів негативний.
6. Два точкові заряди  $+q$  і  $-q$  розміщені на відстані  $a$  один від одного (див. рисунок). Знайдіть напруженість поля в точці  $A$ , яка ділить відрізок, що сполучає заряди, навпіл; у точках  $B$  і  $C$ , розташованих на продовженнях цього відрізка, на відстані  $\frac{a}{2}$  від найближчого заряду.



## § 42. РОБОТА З ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАРЯДУ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ. ПОТЕНЦІАЛ



У повсякденному житті ми доволі часто, особливо в суху погоду, зустрічаемось із ситуацією, коли, торкнувшись якогось тіла, відчуваємо неприємний удар. Як показує досвід, таких сюрпризів можна чекати від тіл, що мають високий потенціал. Саме з поняттям потенціалу ви ознайомитеся у цьому параграфі.

### 1 Як розрахувати роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

Якщо електростатичне поле діє з деякою силою на електрично заряджені тіла, то воно здатне виконати роботу з переміщення цих тіл.

Нехай в однорідному електричному полі напруженістю  $\vec{E}$  позитивний точковий заряд  $q$  переміщується з точки 1 з координатою  $x_1$  у точку 2 з координатою  $x_2$  (рис. 42.1).

Обчислимо роботу  $A$ , яку виконує сила  $\vec{F}$ , що діє на заряд з боку електростатичного поля. За означенням роботи:  $A = \vec{F} \cdot \vec{s} \cos \alpha$ .

Поле однорідне, тому сила  $\vec{F}$  є незмінною, її модуль дорівнює:  $F = qE$ , а  $s \cos \alpha = d = x_2 - x_1$  є проекцією вектора переміщення на напрямок силових ліній поля. Отже, *робота сил однорідного електростатичного поля в ході переміщення електричного заряду  $q$  із точки 1 у точку 2 ( $A_{1 \rightarrow 2}$ ) дорівнює:*

$$A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1), \text{ або } A_{1 \rightarrow 2} = qEd$$

**Зверніть увагу!** Якби в даному випадку заряд переміщувався не з точки 1 у точку 2, а навпаки, то знак роботи змінився б на протилежний, тобто робота виконувалася б проти сил поля.

**?** Який результат було б отримано, якби з точки 1 у точку 2 переміщувався не позитивний, а негативний заряд?

### 2 Потенціальна енергія зарядженого тіла в полі, створеному точковим зарядом

Заряджене тіло, розміщене в електростатичному полі, так само як тіло, що перебуває в гравітаційному полі Землі, має потенціальну

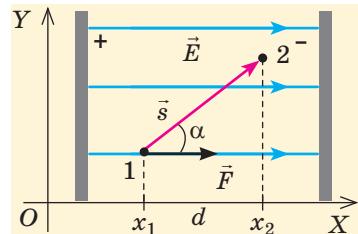


Рис. 42.1. До обчислення роботи сили однорідного електростатичного поля

*Зверніть увагу!*

Формула  $A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1)$  буде справдіжуватись у випадках руху заряду будь-якою траєкторією. Тобто однорідне електростатичне поле є **потенціальним**. Потенціальним є будь-яке електростатичне поле: робота електростатичних (кулонівських) сил (як і робота гравітаційних сил) не залежить від форми траєкторії, якою переміщується заряд, а визначається початковим і кінцевим положеннями заряду; у випадку замкненої траєкторії руху заряду робота сил поля дорівнює нулю.

енергію. Потенціальну енергію заряду, розташованого в електричному полі, зазвичай позначають символом  $W_p$ . Відповідно до теореми про потенціальну енергію зміна потенціальної енергії заряду, взята з протилежним знаком, дорівнює роботі, яку виконує електростатичне поле під час переміщення заряду із точки 1 у точку 2 поля:

$$-\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = A_{1 \rightarrow 2}$$

*Потенціальну енергію взаємодії двох точкових зарядів  $Q$  і  $q$ , розташованих на відстані  $r$  один від одного, визначають за формулою:*

$$W_p = k \frac{Qq}{r}$$

*Зверніть увагу:* 1) потенціальна енергія взаємодії зарядів *додатна* ( $W_p > 0$ ), якщо заряди *однійменні*, і *від'ємна* ( $W_p < 0$ ), якщо заряди *різноїменні*; 2) якщо заряди нескінченно віддалити один від одного ( $r \rightarrow \infty$ ), то  $W_p = 0$  (заряди не взаємодіятимуть).

Таким чином, потенціальна енергія взаємодії двох точкових зарядів дорівнює роботі, яку має виконати електростатичне поле для збільшення відстані між цими зарядами від  $r$  до нескінченності.

### 3

### Що називають потенціалом електростатичного поля

Потенціал  $\varphi$  електростатичного поля в даній точці — це скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості поля і дорівнює відношенню потенціальної енергії  $W_p$  електричного заряду, поміщеного в дану точку поля, до значення  $q$  цього заряду:

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

Одиниця потенціалу в СІ — вольт:  $[\varphi] = 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \left( 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right)$ .

Із означення потенціалу випливає, що *потенціал  $\varphi$  поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , у точках, які розташовані на відстані  $r$  від цього заряду, можна розрахувати за формулою:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$  (\*).*

Із формули (\*) бачимо: 1) якщо поле створене позитивним точковим зарядом ( $Q > 0$ ), то потенціал цього поля в будь-якій точці є додатним ( $\varphi > 0$ ); 2) якщо поле створене негативним точковим зарядом ( $Q < 0$ ), то потенціал цього поля в будь-якій точці є від'ємним ( $\varphi < 0$ ). Формула (\*) спрощується і для потенціалу поля рівномірно зарядженої сфери (або кулі) на відстанях, які більші за її радіус або дорівнюють їйому.

Якщо поле утворене кількома довільно розташованими зарядами, потенціал  $\varphi$  поля в будь-якій точці цього поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  полів, створених кожним зарядом:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$$

## 4

**Як визначають різницю потенціалів**

Коли в електростатичному полі заряд рухається з точки 1 у точку 2, це поле виконує роботу, яка дорівнює зміні потенціальної енергії заряду, взятій із протилежним знаком:  $A_{1 \rightarrow 2} = W_{p1} - W_{p2}$ . Оскільки  $W_p = q\Phi$ , то  $A_{1 \rightarrow 2} = q\Phi_1 - q\Phi_2 = q(\Phi_1 - \Phi_2)$ . Вираз  $(\Phi_1 - \Phi_2)$  — *різниця значень потенціалу*  $\Phi_1$  *у початковій точці* і *потенціалу*  $\Phi_2$  *у кінцевій точці траєкторії руху заряду* — має назву *різниця потенціалів*.

**Різниця потенціалів** — скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сил електростатичного поля з переміщенням заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$$

*Одниниця різниці потенціалів в СІ — вольт:  $[\Phi_1 - \Phi_2] = 1 \text{ В (V)}$ .*

*Різниця потенціалів між двома точками поля дорівнює 1 В, якщо для переміщення між ними заряду 1 Кл електричне поле виконує роботу 1 Дж.*

Зазначимо, що різницю потенціалів  $(\Phi_1 - \Phi_2)$  у подібних випадках також називають *напругою* ( $U$ ). Важливо не плутати *зміну потенціалу*  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  і *різницю потенціалів (напругу)*  $\Phi_1 - \Phi_2$ .

## 5

**Як пов'язані напруженість електростатичного поля і різниця потенціалів**

Розглянемо *однорідне* електростатичне поле на ділянці між точками 1 і 2, розташованими на відстані  $d$  одна від одної; нехай із точки 1 у точку 2 під дією поля переміщується заряд  $q$  (рис. 42.2). Виконувану полем роботу можна подати через різницю потенціалів  $(\Phi_1 - \Phi_2)$  між точками 1 і 2:  $A_{1 \rightarrow 2} = q(\Phi_1 - \Phi_2)$  — або через напруженість  $\vec{E}$  поля:  $A_{1 \rightarrow 2} = Fscos\alpha = qEdcos\alpha = = qE_x d$ , де  $E_x = Ecos\alpha$  — проекція вектора  $\vec{E}$  на вісь  $OX$ , проведену через точки 1 і 2.

Зіставивши обидва вирази для роботи, маємо:  $q(\Phi_1 - \Phi_2) = qE_x d$ , звідки:  $\Phi_1 - \Phi_2 = E_x d$ , або

$$E_x = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}.$$

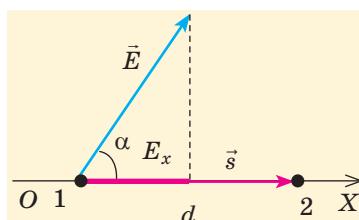
У випадку коли напрямок переміщення заряду і напрямок напруженості електричного поля збігаються ( $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{s}$ ), ця формула набуває вигляду:

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}, \text{ або } E = \frac{U}{d}$$



Із останньої формули випливає *одниниця напруженості в СІ — вольт на метр*:

$$[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \text{ Доведіть, що } 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$



**Рис. 42.2.** До виведення формули зв'язку напруженості електростатичного поля та різниці потенціалів

## 6

**Які поверхні називають еквіпотенціальними**

Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують також **еквіпотенціальні поверхні**.

**Еквіпотенціальна поверхня** — це поверхня, в усіх точках якої потенціал електростатичного поля має однакове значення.

Для більшої наочності слід розглядати не одну еквіпотенціальну поверхню, а їх сукупність. Проте графічно зобразити сукупність складних поверхонь на одному рисунку дуже важко, тому зазвичай зображують тільки лінії перетину еквіпотенціальних поверхонь певною площиною (рис. 42.3).

Еквіпотенціальні поверхні тісно пов'язані із силовими лініями електростатичного поля. Якщо електричний заряд переміщується по еквіпотенціальній поверхні, то робота поля дорівнює нулю, оскільки  $A = q(\phi_1 - \phi_2)$ , а на еквіпотенціальній поверхні  $\phi_1 = \phi_2$ . Цю роботу поля можна також подати через силу  $\vec{F}$ , що діє на заряд з боку електричного поля:  $A = Fscos\alpha$ , де  $s$  — модуль переміщення заряду;  $\alpha$  — кут між векторами  $\vec{F}$  і  $\vec{s}$ . Оскільки  $A = 0$ , а  $F \neq 0$  і  $s \neq 0$ , то  $cos\alpha = 0$ , отже,  $\alpha = 90^\circ$ . Це означає, що під час руху заряду вздовж еквіпотенціальної поверхні вектор сили  $\vec{F}$ , а отже, й вектор напруженості  $\vec{E}$  поля в будь-якій точці перпендикулярні до вектора переміщення  $\vec{s}$ . Таким чином, **силові лінії електростатичного поля перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь** (див. рис. 42.3).

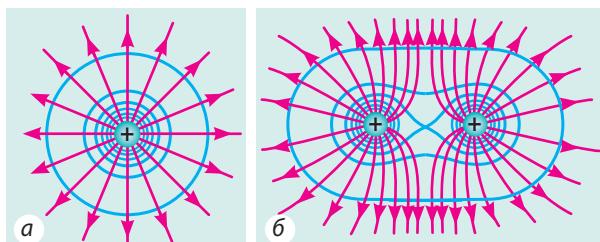
**Зверніть увагу!** Симетрія еквіпотенціальних поверхонь повторює симетрію джерел поля. Так, поле точкового заряду сферично симетричне, тож еквіпотенціальними поверхнями поля точкового заряду є концентричні сфери; у випадку однорідного поля еквіпотенціальні поверхні — це система паралельних площин.

## 7

**Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** Електрон, розпочавши рух із стану спокою, пройшов прискорювальну різницю потенціалів  $-300$  В. Якої швидкості набув електрон? Маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, заряд становить  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Аналіз фізичної проблеми.** Заряд електрона — негативний, його початкова швидкість  $v_0 = 0$ , тому під дією сил поля електрон рухатиметься в напрямку, протилежному напрямку силових ліній поля, тобто в напрямку збільшення потенціалу. Поле буде виконувати додатну роботу, в результаті кінетична енергія електрона і його швидкість зростатимуть. Отже, скористаємося формулами для розрахунку роботи електростатичного поля, поданою через різницю потенціалів, і теоремою про кінетичну енергію.



**Рис. 42.3.** Еквіпотенціальні поверхні (сині лінії) і силові лінії (чорвоні лінії) простих електростатичних полів, створених: а — позитивним точковим зарядом; б — двома рівними за модулем позитивними точковими зарядами

**Дано:**

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -300 \text{ В}$$

$$v_0 = 0$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$v = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Згідно з теоремою про кінетичну енергію:

$$A = \Delta W_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}, \text{ де } A = e(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ — робота сил поля.}$$

$$\text{Таким чином, } e(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } v = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot (-300)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ (м/с).}$$

**Відповідь:**  $v \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$ 

### Підбиваємо підсумки

- Електростатичне поле є потенціальним. В електростатичному полі робота з переміщення заряду  $q$  між двома довільними точками 1 і 2 не залежить від форми траєкторії; дорівнює зміні потенціальної енергії  $W_p$  заряду, взятої із протилежним знаком, а у випадку однорідного поля обчислюється за формулою  $A_{1 \rightarrow 2} = qEd$ .
- Енергетичною характеристикою електростатичного поля є потенціал  $\varphi$ , який визначається відношенням потенціальної енергії  $W_p$  електричного заряду, поміщеного в дану точку електростатичного поля, до значення  $q$  цього заряду:  $\varphi = \frac{W_p}{q}$ . Одиниця потенціалу в СІ — вольт (В);  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ .
- Потенціал поля, створеного у вакуумі точковим зарядом  $Q$ , у точках, що розташовані на відстані  $r$  від цього заряду:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$ . Потенціал поля, створеного системою зарядів:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$ .
- Різниця потенціалів між двома точками  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  — скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню роботи  $A_{1 \rightarrow 2}$  сил електростатичного поля з переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення  $q$  цього заряду:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$ . Напруженість однорідного електростатичного поля пов'язана з різницею потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  співвідношенням  $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$ .
- Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують еквіпотенціальні поверхні — поверхні рівного потенціалу.

### Контрольні запитання



- Як визначають роботу однорідного електростатичного поля з переміщення заряду в цьому полі? Чи залежить вона від форми траєкторії руху заряду? **2.** Чому дорівнює потенціальна енергія взаємодії двох точкових зарядів? **3.** Що називають потенціалом електростатичного поля? **4.** Як розраховують потенціал поля точкового заряду? **5.** Що таке різниця потенціалів? **6.** Яким є співвідношення

між напруженістю поля і різницею потенціалів для однорідного електростатичного поля? 7. Які поверхні називають еквіпотенціальними? 8. Як розташовані лінії напруженості поля відносно еквіпотенціальних поверхонь?



### Вправа № 42

1. Заряди  $q$  і  $2q$  розташовані на відстані  $R$  один від одного. Як зміниться потенціальна енергія взаємодії зарядів, якщо збільшити вдвічі відстань між зарядами? якщо збільшити вдвічі значення кожного заряду?
2. В однорідному електричному полі напруженістю  $500 \text{ Н/Кл}$  перемістили заряд  $q = -40 \text{ нКл}$  у напрямку силової лінії поля на  $15 \text{ см}$ . Яку роботу виконало поле? Як змінилася потенціальна енергія заряду?
3. Заряд  $2 \text{ мКл}$  перемістили з точки  $A$ , розташованої на відстані  $10 \text{ см}$  від точкового заряду  $Q = 5 \text{ мКл}$ , у точку  $B$ , розташовану від заряду  $Q$  на відстані  $5 \text{ см}$ . Яку роботу виконало електричне поле? Чи буде ця робота залежати від того, якою траєкторією переміщували заряд?
4. В електростатичному полі із точки з потенціалом  $450 \text{ В}$  у точку з потенціалом  $900 \text{ В}$  рухається негативно заряджена частинка. Електричне поле виконує при цьому роботу  $1,8 \text{ мКДж}$ . Визначте модуль заряду частинки.
5. Електрон, рухаючись зі швидкістю  $3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , влітає в електричне поле. Визначте різницю потенціалів, яку необхідно пройти електрону, щоб швидкість його руху зменшилася до  $1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ .

### Експериментальне завдання

Ви знаєте, як небезпечно торкатися проводу під напругою.

Але відомо багато випадків, коли людина або тварина гинули, лише опинившися поряд із відірваним проводом. Виконавши експериментальне завдання, ви зрозумієте, як запобігти таким ситуаціям. Вам знадобляться: два ізольовані товсті проводи завдовжки  $10\text{--}15 \text{ см}$  і один такий провід завдовжки  $20\text{--}25 \text{ см}$ , світлодіод, джерело постійного струму ( $40 \text{ В}$ ), дві ємності — із вологим і сухим піском.



1. Зачистіть кінці проводів і виготовте із двох коротших фігурку (див. рисунок).
2. З'єднайте «руки» фігурки зі світлодіодом, «ноги» занурте у вологий пісок.
3. Один кінець довгого проводу приєднайте до позитивного полюса джерела постійного струму, другий кінець занурте в пісок.

Увімкніть джерело струму та, спостерігаючи за світінням світлодіода, здійсніть низку експериментів: помістіть фігурку спочатку більше до місця занурення проводу, потім далі; поставте «ступні» фігурки майже впритул одну до одної, потім збільште відстань між «ступнями»; «взурте» фігурку; занурте «ступні» фігурки в сухий пісок. Зробіть висновки.

### Фізика і техніка в Україні

**Національний університет «Львівська політехніка»** — найдавніший технічний університет Східної Європи (заснований у 1816 р.).

За 200-річну історію університет підготував понад 250 тисяч фахівців, а кожен 12-й львів'янин є його випускником.

В університеті сформувалися наукові школи за напрямами: математика, теоретична та прикладна механіка, радіотехніка, електротехніка, астрономія, геодезія, приладобудування, вимірювальна техніка, наноматеріали і нанотехнології, енерго- та ресурсозберігаючі технології, перспективні комп'ютерні системи та інформаційні технології.

## § 43. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ



Проводячи аналогії між гравітаційною та електростатичною взаємодіями, ми знаходили спільні для них властивості. Однак між ними існують і суттєві відмінності. Одна з них — усероникність гравітаційного поля. Справді, сховище від сили тяжіння побудувати неможливо. А от від дії сил електростатичного поля можна сховатися досить надійно, побудувавши захист із провідника. З'ясуємо, чому це є можливим.

### 1 Якими є особливості внутрішньої будови провідників

Будь-яка речовина складається з молекул, атомів або іонів, які, у свою чергу, містять заряджені частинки. Тому, якщо тіло помістити в електричне поле, це спричинить певні зміни в речовині, з якої тіло виготовлено. Зрозуміло, що ці зміни залежать від властивостей самої речовини. За електричними властивостями речовінні розділяють на *проводники, діелектрики, напівпровідники*.

**Провідники** — це речовини, здатні проводити електричний струм. Будь-який провідник містить заряджені частинки, що можуть вільно пересуватися. Типові представники провідників — метали. Нагадаємо: внутрішня структура металів являє собою утворену позитивно зарядженими іонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Саме наявність вільних електронів зумовлює провідні властивості металів. Протівідниками також є електроліти, а за деяких умов — і гази. В електролітах вільними зарядженими частинками є позитивні й негативні іони, а в газах — електрони.

### 2 Електростатичні властивості провідників

**Властивість 1.** *Напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю.* Помістимо металевий провідник в електростатичне поле (рис. 43.1). Під дією поля рух вільних електронів стане напрямленим. Якщо електричне поле не надто велике, то електрони не можуть залишити провідник і накопичуються в певній області його поверхні, — ця область поверхні провідника набуває негативного заряду; протилежна — позитивного (його створюють позитивні іони, що там залишилися). Таким чином, на поверхні провідника з'являються *наведені (індуковані)* електричні заряди, при цьому сумарний заряд провідника залишається незмінним (рис. 43.2).

Явище перерозподілу електричних зарядів у провіднику, поміщенному в електростатичне поле, у результаті чого на поверхні провідника виникають електричні заряди, називають *явищем електростатичної індукції*.

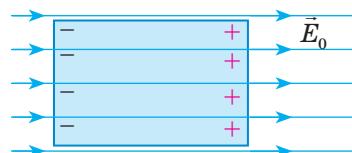


Рис. 43.1. Зовнішнє електричне поле індукує на поверхні провідника заряди протилежних знаків

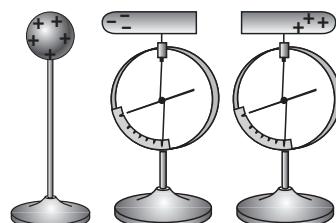
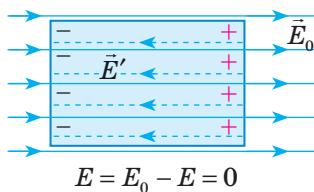


Рис. 43.2. Якщо два металеві циліндри, які контактиують один з одним, роз'єднати за присутності поряд зарядженої кулі, то кожен циліндр виявиться зарядженим



**Рис. 43.3.** Перерозподіл зарядів у провіднику відбувається доти, доки модуль напруженості  $\vec{E}'$  поля індукованих зарядів не дорівнюватиме модулю напруженості  $\vec{E}_0$  індукованого поля

Індуковані заряди, що виникли, створюють власне електричне поле напруженістю  $\vec{E}'$ , яка напрямлена в бік, протилежний напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис. 43.3). Процес перерозподілу зарядів у провіднику триватиме до моменту, коли створюване індукованими зарядами поле всередині провідника повністю компенсує зовнішнє поле. За дуже малий інтервал часу напруженість  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  результуючого поля всередині провідника дорівнюватиме нулю.

Який процес відбувався б, якби всередині провідника тривалий час існувало електричне поле?

**Властивість 2.** Поверхня провідника є еквіпотенціальною. Це твердження є прямим наслідком зв'язку між напруженістю поля і різницею по-

тенціалів:  $E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}$ . Якщо напруженість поля всередині провідника дорівнює нулю, то різниця потенціалів також дорівнює нулю, тому потенціали в усіх точках провідника є однаковими.

**Властивість 3.** Увесь статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні.

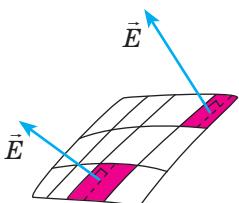
Ця властивість є наслідком закону Кулона і властивості однайменних зарядів відштовхуватися.

**Властивість 4.** Вектор напруженості електростатичного поля є перпендикулярним до поверхні провідника (рис. 43.4).

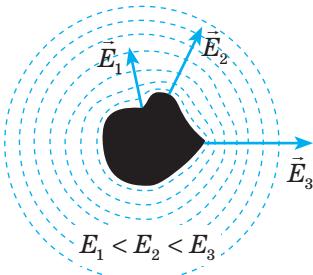
Доведемо властивість 4 методом від супротивного. Припустимо, що в певній точці поверхні провідника вектор  $\vec{E}$  напруженості електростатичного поля напрямлений під деяким кутом до поверхні провідника. Розкладемо цей вектор на два складники: нормальній  $\vec{E}_n$ , перпендикулярний до поверхні, і тангенціальний  $\vec{E}_\tau$ , напрямлений по дотичній до поверхні.

Зрозуміло, що під дією  $\vec{E}_\tau$  електрони направлено рухатимуться по поверхні, але це означає, що по поверхні провідника тече електричний струм, а це, у свою чергу, суперечить закону збереження енергії, отже:  $\vec{E}_\tau = 0$ , тому  $\vec{E} = \vec{E}_n$ .

**Властивість 5.** Електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах (рис. 43.5).



**Рис. 43.4.** У будь-якій точці поверхні провідника напруженість  $\vec{E}$  електричного поля напрямлена перпендикулярно до цієї поверхні



**Рис. 43.5.** Напруженість електростатичного поля провідника більша на виступах провідника і менша на його западинах

### 3 Як застосовують електростатичні властивості провідників

Наведемо деякі приклади використання розглянутих електростатичних властивостей провідників.

**Електростатичний захист.** Іноді виникає необхідність ізолятувати від впливу зовнішніх електричних полів деякі прилади. Очевидно, що для цього їх необхідно помістити всередину металевого корпусу, оскільки зовнішнє електричне поле викликає появу індукованих зарядів тільки на поверхні провідника, а поле всередині провідника відсутнє (рис. 43.6). Аналогічний ефект досягається, якщо суцільну провідну оболонку замінити металевою сіткою з дрібними гніздами: електричне поле проникає за сітку лише на глибину порядку розмірів гнізда сітки.

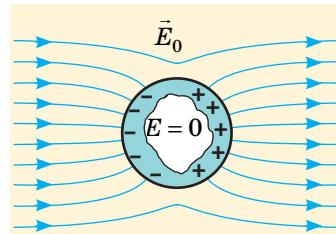
**Заземлення.** Щоб розрядити невелике зарядене тіло, його необхідно з'єднати провідником із тілом більших розмірів, адже на тілі більших розмірів накопичується більший електричний заряд. Щоб обґрунтувати це твердження, розглянемо дві з'єднані провідником провідні кулі радіусами  $R_1$  і  $R_2$ , розташовані одна від одної на великій (порівняно з їхніми радіусами) відстані  $l$  (рис. 43.7). Електричний заряд  $Q$ , переданий системі, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали будуть рівними ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ). Відстань між кулями значно більша за їхні радіуси, тому, розраховуючи потенціали  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  куль, взаємним впливом їхніх полів можна знехтувати і скористатися формулою для визначення потенціалу кулі:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R_1}; \quad \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_2}.$$

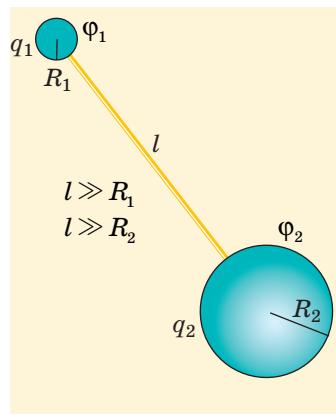
Оскільки  $\varphi_1 = \varphi_2$ , одержимо, що заряди куль прямо пропорційні їхнім радіусам:  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$ .

**Зверніть увагу!** Якщо одна із заряджених куль значно більша за другу, після їх з'єднання практично весь заряд виявиться на більшій кулі. Цей висновок спрвджується і для провідних тіл довільної форми. Так, якщо до кондуктора зарядженого електроскопа торкнутися рукою, заряд перерозподілиться між кондуктором і тілом людини, але оскільки людина значно більша за розмір пристрою, то можна вважати, що весь заряд перейде на людину.

Часто як тіло великих розмірів використовують усю земну кулю: прилади, на яких не повинен збиратись електричний заряд, «заземлюють» — приєднують до масивного провідника, закопаного в землю.



**Рис. 43.6.** Електростатичний захист. Під дією зовнішнього поля на поверхні металевого корпусу виникають індуковані заряди, поле яких екранує зовнішнє електричне поле: напруженість поля всередині корпусу стає рівною нулю

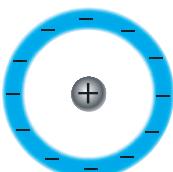
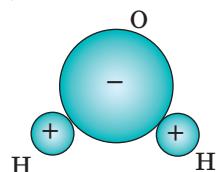
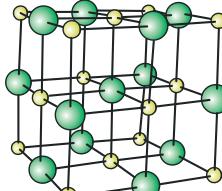


**Рис. 43.7.** Заряд  $Q$ , переданий системі з двох куль, з'єднаних провідником, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  будуть рівними

## 4

## Які особливості внутрішньої будови діелектриків

Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм: за звичайних умов в них практично відсутні заряди, що можуть вільно пересуватися. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три групи.

Неполярні діелектрики	Полярні діелектрики	Йонні діелектрики
<p>Речовини, молекули (атоми) яких неполярні: за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри розподілу позитивних і негативних зарядів, з яких складається молекула (атом), збігаються.</p>  <p>Типовими прикладами таких речовин є одноатомні інертні гази; гази, що складаються із симетричних двоатомних молекул; деякі органічні рідини; пластмаси.</p>	<p>Речовини, молекули яких полярні: за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри розподілу позитивних і негативних зарядів, з яких складається молекула, не збігаються, тобто електронні хмари в молекулах зміщені до одного з атомів.</p>  <p>Прикладом полярного діелектрика є вода (<math>\text{H}_2\text{O}</math>). Молекули води, як і молекули інших полярних діелектриків, являють собою мікроскопічні електричні диполі.</p>	<p>Речовини, які мають іонну структуру. Серед них солі та луги, наприклад натрій хлорид (<math>\text{NaCl}</math>). Кристалічні ґратки багатьох іонних діелектриків можна розглядати як такі, що складаються з двох вставленіх одна в одну підграток, кожна з яких утворена іонами одного знака. За відсутності зовнішнього поля кожна комірка кристала в цілому є електронейтральною.</p> 

## 5

## Як електростатичне поле впливає на діелектрик

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє **поляризацію діелектрика**. У процесі поляризації неполярних діелектриків виявляється **електронний (деформаційний) механізм**. Під дією зовнішнього електростатичного поля молекули неполярних діелектриків поляризуються:

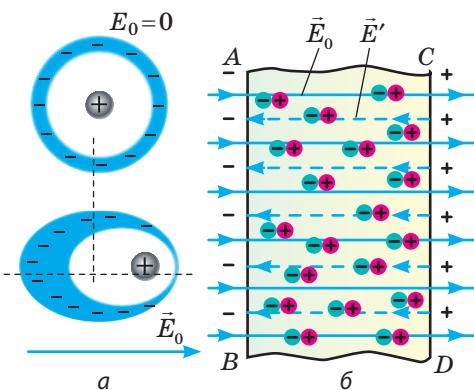


Рис. 43.8. Неполярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю  $\vec{E}_0$

позитивні заряди зміщуються в напрямку вектора напруженості  $\vec{E}_0$  цього поля, а негативні — у протилежному напрямку (рис. 43.8, а). Зрештою молекули перетворюються на електричні диполі, розташовані ланцюжками вздовж силових ліній зовнішнього поля. У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються нескомпенсовані **зв'язані** заряди протилежних знаків, що утворюють своє поле, напруженість  $\vec{E}'$  якого напрямлена назустріч напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис. 43.8, б).

У процесі поляризації **полярних діелектриків** виникає **орієнтаційна поляризація**. Під дією зовнішнього електричного поля дипольні молекули діелектрика намагаються повернутися так, щоб їхні осі були розташовані вздовж силових ліній поля. Проте тепловий рух молекул перешкоджає цьому процесу. Тому виникає лише часткове впорядкування дипольних молекул (рис. 43.9).

Наявність упорядкування в розташуванні молекул є причиною того, що на поверхнях *AB* і *CD* з'являються нескомпенсовані зв'язані заряди протилежних знаків. Ці заряди утворюють своє поле напруженістю  $\vec{E}'$ , напрямок якої протилежний напрямку напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Зауважимо, що в полярних діелектриках наявний і **електронний механізм поляризації**, тобто внаслідок дії електричного поля відбувається зсув зарядів у молекулах. Однак ефект орієнтації на кілька порядків перевершує електронний ефект, тому останнім часто нехтують.

У процесі поляризації **йонних діелектриків** спостерігається **йонна поляризація**. Унаслідок дії зовнішнього поля йони різних знаків, що складають дві підгратки, зміщуються в протилежних напрямках, від чого на гранях кристала з'являються нескомпенсовані зв'язані заряди, тобто кристал поляризується. Слід підкреслити, що йонна поляризація в чистому вигляді не спостерігається, — її завжди супроводжує електронна поляризація.

## 6

### Як діелектрик впливає на електростатичне поле

Розглядаючи різні механізми поляризації діелектриків, ви дізналися, що внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє появу зв'язаних зарядів на його поверхні. Зв'язані заряди створюють електричне поле напруженістю  $\vec{E}'$ , яка всередині діелектрика напрямлена протилежно вектору напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Через це поле всередині діелектрика слабшає. У результаті напруженість  $\vec{E}$  результуючого поля всередині діелектрика виявляється за модулем меншою, ніж напруженість  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля:  $E = E_0 - E'$ . Зменшення модуля напруженості  $\vec{E}$  електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості  $\vec{E}_0$  електростатичного поля у вакуумі характеризується фізичною величиною, яку називають **діелектрична проникність**  $\epsilon$  речовини:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Діелектричні проникності різних речовин можуть відрізнятися в десятки разів. Так, діелектрична проникність газів близька до одиниці,

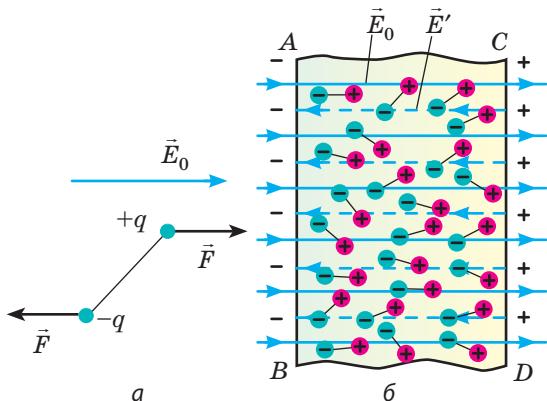


Рис. 43.9. Полярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю  $\vec{E}_0$

рідких і твердих неполярних діелектриків — до кількох одиниць, полярних діелектриків — до кількох десятків одиниць (для води  $\epsilon = 81$ ). Є речовини (їх називають *сегнетоелектриками*), діелектрична проникність яких становить значення порядку десятків і сотень тисяч.

Зменшення напруженості електричного поля в діелектрику в  $\epsilon$  разів порівняно з напруженістю поля у вакуумі спричиняє те саме зменшення сили електростатичної взаємодії. Тому закон Кулона для випадку взаємодії двох електричних зарядів, які мають значення  $q_1$  і  $q_2$  і розташовані в діелектрику на відстані  $r$  один від одного, має вигляд:  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$ .

Так само змінюються формулі для визначення потенціалу  $\phi$  і модуля напруженості  $E$  поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , розташованим у діелектрику:  $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$ ,  $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$ , де  $r$  — відстань від заряду до точки, в якій визначається напруженість або потенціал поля.



Сформулюйте підсумки § 43 самостійно. Спробуйте використати не більше 150–200 слів.



### Контрольні запитання

1. Які речовини називають провідниками?
2. Що таке електростатична індукція?
3. Назвіть основні електростатичні властивості провідників.
4. Як захищають обладнання та прилади від впливу електричного поля?
5. Навіщо застосовують заземлення?
6. Які речовини називають діелектриками? Наведіть приклади.
7. Чим відрізняються полярні діелектрики від неполярних?
8. Що називають поляризацією діелектрика? Якими є її механізми?
9. Що характеризує діелектрична проникність речовини?



### Вправа № 43

1. Чому незаряджені тіла притягуються до заряджених тіл?
2. До кондуктора зарядженого електрометра підносять (не торкаючись до нього) незаряджене провідне тіло. Як і чому зміниться відхилення стрілки електрометра? Відповідь перевірте експериментально.
3. Чи зміняться результати досліду, поданого на рис. 43.2, якщо циліндри будуть виготовлені з діелектрика? Відповідь обґрунтуйте.
4. Незаряджена гільза з фольги висить на шовковій нитці. До неї наближають заряджену паличку. Опишіть і поясніть подальшу «поведінку» гільзи.
5. Над кондуктором зарядженого електрометра розташували незаряджену пластину з оргскла. Як зміниться відхилення стрілки електрометра?
6. Дві маленькі кульки, заряди яких однакові за модулем, перебуваючи в трансформаторному мастилі на відстані 50 см одна від одної, взаємодіють із силою 2,2 мН. Визначте модуль заряду кожної кульки. Діелектрична проникність трансформаторного мастила 2,2.
7. Заряджена металева кулька масою 40 г і об'ємом 4,2 см<sup>3</sup> лежить на дні посудини з мастилом. Після того як систему помістили в однорідне електростатичне поле напруженістю 4,0 МВ/м, кулька спливла. Знайдіть мінімальний заряд кульки. Густина мастила 800 кг/м<sup>3</sup>, діелектрична проникність — 5.
8. Який пристрій зображений на фото, поданому на початку § 43? Хто, коли і для чого його сконструював?



## § 44. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ. ЕНЕРГІЯ ЗАРЯДЖЕНОГО КОНДЕНСАТОРА



Те, що гроші зберігають у банках, знає навіть першокласник. А от де зберігають заряди? І навіщо взагалі це потрібно? Відповіді ви знайдете в цьому параграфі.

### 1 Що таке електроємність

Електроємність характеризує здатність провідників або системи з кількох провідників накопичувати електричний заряд.

Розрізняють електроємність відокремленого провідника та електроємність системи провідників (наприклад, конденсатора). *Відокремленим* називають провідник, розташований на віддалі від інших тіл так, що вони не здійснюють на цей провідник жодного впливу.

Електроємність відокремленого провідника ( $C$ ) — фізична величина, яка характеризує здатність провідника накопичувати заряд і дорівнює відношенню електричного заряду  $q$  відокремленого провідника до його потенціалу  $\phi$ :

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

Одиниця електроємності в СІ — фарад:  $[C] = 1 \text{ Ф}$  (названа на честь М. Фарадея). 1 Ф — це електроємність такого провідника, потенціал якого дорівнює 1 В, коли йому надають заряд 1 Кл;  $1 \text{ Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \left( 1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} \right)$ .

Оскільки 1 Ф — дуже велика одиниця ємності, звичай застосовують частинні одиниці:  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ;  $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ ;  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ .

### 2 Що таке конденсатор

Пристрій, що являє собою систему з двох провідних обкладок, розділених шаром діелектрика, товщина якого є малою порівняно з розмірами обкладок, називають конденсатором (рис. 44.1).

Обкладкам конденсатора передають однакові за модулем, але протилежні за знаком заряди, що сприяє накопиченню зарядів: різноміенні заряди притягуються, а отже, розташовуються на внутрішніх поверхнях обкладок.

Звичай для зарядження конденсатора обидві його обкладки з'єднують із полюсами батареї акумуляторів: на обкладках з'являються рівні за модулем, але протилежні за знаком заряди. Результат не зміниться, якщо з'єднати з полюсом батареї тільки одну обкладку, заземливши другу:

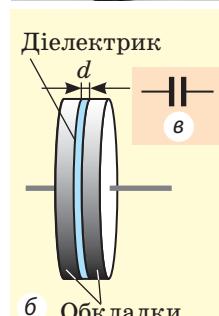


Рис. 44.1. Шкільний повітряний конденсатор: а — вигляд; б — будова; в — позначка на схемах

внаслідок електростатичної індукції на заземленій обкладці також з'явиться заряд, який дорівнюватиме за модулем заряду на іншій обкладці, але матиме протилежний знак.

*Зарядом конденсатора називають модуль заряду однієї з його обкладок.* Відношення заряду  $q$  даного конденсатора до різниці потенціалів  $(\Phi_1 - \Phi_2)$  між його обкладками не залежить ані від  $q$ , ані від  $(\Phi_1 - \Phi_2)$ , а отже, може слугувати характеристикою конденсатора. Таку характеристику називають *електроємністю конденсатора*. Електроємність конденсатора визначається за формулами:

$$C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2}, \text{ або } C = \frac{q}{U},$$

де  $U$  — напруга між обкладками, яка в даному випадку дорівнює різниці потенціалів між ними.

Як показують дослідження, ємність конденсатора збільшується, якщо збільшити площину поверхні обкладок або наблизити обкладки одну до одної. На ємність конденсатора впливає також діелектрик: чим більша його діелектрична проникність, тим більшу ємність має конденсатор порівняно з ємністю такого самого конденсатора, діелектриком у якому слугує повітря.

Конденсатор, який складається з двох паралельних металевих пластин (обкладок), розділених шаром діелектрика, називають *плоским* (див. рис. 44.1). Електроємність плоского конденсатора обчислюють за формулою:

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

де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м}$  — електрична стала;  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика;  $S$  — площа пластини конденсатора;  $d$  — відстань між пластинами.

Поле між пластинами плоского конденсатора є однорідним, тому зв'язок між напруженістю  $E$  поля між пластинами і напругою  $U$  на пластинах конденсатора подається як  $U = Ed$ .

### 3

### Як розраховують електроємність батареї конденсаторів

Кожен конденсатор характеризується ємністю і *максимальною робочою напругою  $U_{\max}$* . Якщо напруга на конденсаторі значно перевищує  $U_{\max}$ , то відбувається *пробій* — між обкладками конденсатора виникає іскра, яка руйнує ізоляцію. Щоб одержати необхідну електроємність за певної робочої напруги, конденсатори з'єднують між собою в *батареї*, застосовуючи при цьому *паралельне, послідовне і змішане з'єднання*.

Для простоти сприйняття розглядатимемо батарею, яка складається з трьох конденсаторів електроємностями  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  відповідно.

У разі *паралельного з'єднання конденсаторів* позитивно заряджені обкладки всіх конденсаторів з'єднують в один вузол, а негативно заряджені — в інший вузол (рис. 44.2). У такому випадку загальний заряд  $q$  батареї конденсаторів дорівнює алгебраїчній сумі зарядів окремих конденсаторів:  $q = q_1 + q_2 + q_3$ , де  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  — заряд першого, другого і третього конденсаторів відповідно.

З'єднані в один вузол обкладки являють собою один провідник, тому потенціали обкладок і різниця потенціалів (напруга) між обкладками всіх конденсаторів однакові:  $U = U_1 = U_2 = U_3$ .

Отже, у випадку паралельного з'єднання конденсаторів допустима робоча напруга батареї визначається робочою напругою одного конденсатора.

Оскільки  $q = CU$ ,  $q_1 = C_1 U$ ,  $q_2 = C_2 U$ ,  $q_3 = C_3 U$ , то  $CU = C_1 U + C_2 U + C_3 U$ , отже, загальна електроємність батареї, яка складається з трьох паралельно з'єднаних конденсаторів, становить:  $C = C_1 + C_2 + C_3$ .

У разі послідовного з'єднання конденсатори з'єднують між собою різномірно зарядженими обкладками (рис. 44.3). У цьому випадку заряди всіх конденсаторів будуть однаковими та дорівнюватимуть заряду батареї:  $q = q_1 = q_2 = q_3$ .

Напруга на батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі напруг на окремих конденсаторах:  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Отже, допустима робоча напруга батареї послідовно з'єднаних конденсаторів більша за допустиму робочу напругу окремого конденсатора.

Ємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів можна обчислити, скориставшись формулою:  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ .



Спробуйте отримати останню формулу самостійно.

У разі послідовного з'єднання конденсаторів ємність батареї менша, ніж ємність конденсатора з мінімальною ємністю.

Наведені співвідношення можна узагальнити для будь-якої кількості конденсаторів.

#### 4

#### Чому дорівнює енергія плоского конденсатора

Заряджений конденсатор, як і будь-яка інша система заряджених тіл, має енергію. У правильності цього твердження можна переконатися за допомогою простого експерименту. Приєднаємо до обкладок зарядженого конденсатора лампочку кишенькового ліхтарика й виявимо, що в момент замикання ключа лампочка спалахує. Тепер вимірюємо напругу на обкладках конденсатора — напруга дорівнюватиме нулю, отже, конденсатор розрився. А це, у свою чергу, означає, що заряджений конденсатор мав енергію, яка частково перетворилася на енергію світла.

Обчислимо енергію зарядженого до напруги  $U_0$  конденсатора ємністю  $C$ , на якому накопичений заряд  $q_0$ . Цю енергію точніше було б назвати енергією електростатичного поля, яке існує між обкладками зарядженого

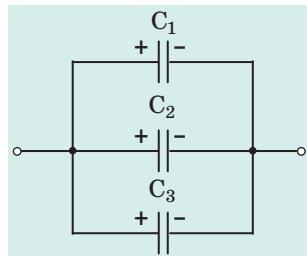


Рис. 44.2. Батарея з трьох паралельно з'єднаних конденсаторів

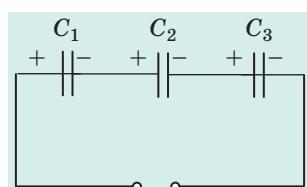
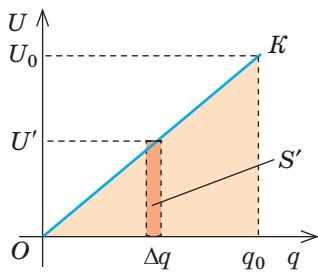


Рис. 44.3. Батарея з трьох послідовно з'єднаних конденсаторів

**Зверніть увагу!**

- Якщо батарея містить  $n$  паралельно з'єднаних конденсаторів електроємністю  $C'$  кожен:  $C = nC'$
- Якщо батарея містить  $n$  послідовно з'єднаних конденсаторів електроємністю  $C'$  кожен:  $\frac{1}{C} = \frac{n}{C'}$ , або  $C = \frac{C'}{n}$



**Рис. 44.4.** До розрахунку роботи, яку виконує електричне поле зарядженого конденсатора під час його розрядження

бутку двох її сторін, тобто:  $S' = \Delta q U' = A'$ , де  $U'$  — напруга, за якої конденсатор утрачив дану «порцію» заряду  $\Delta q$ ;  $A'$  — робота, яку виконає поле під час втрати конденсатором заряду  $\Delta q$ .

Зрозуміло, що повна робота, яку виконає поле під час зменшення заряду конденсатора від  $q_0$  до 0, визначається площею кольорового трикутника. Отже,

$$A = \frac{q_0 U_0}{2}. \text{ Урахувавши, що } q_0 = C U_0, \text{ отримаємо: } A = \frac{C U_0^2}{2}, \text{ або } A = \frac{q_0^2}{2C}.$$

З іншого боку, ця робота дорівнює зменшенню енергії електричного поля конденсатора від  $W_p$  до нуля:  $A = W_p - 0 = W_p$ .

Таким чином, енергія  $W_p$  зарядженого до напруги  $U$  конденсатора, який має електроемність  $C$  і заряд  $q$ , дорівнює:

$$W_p = \frac{q U}{2} = \frac{C U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

## 5

### Для чого потрібні конденсатори

У сучасній *техніці* складно знайти галузь, де широко й різноманітно не застосовувалися конденсатори. Без них не можуть обійтися *радіотехнічна* та *телевізійна апаратура* (настроювання коливальних контурів), *радіолокаційна* та *лазерна техніка* (одержання потужних імпульсів), *телефонія* та *телефрафія* (розділення кіл змінного та постійного струмів, гасіння іскор у контактах), *техніка лічильного обладнання* (у спеціальних запам'ятовувальних пристроях), *електровимірювальна техніка* (створення зразків ємності). І це далеко не повний перелік.

У сучасній *електроенергетиці* конденсатори також мають доволі різноманітне застосування: вони обов'язково присутні в конструкціях люмінесцентних освітлювачів, електrozварювальних апаратів, пристрій захисту від перенапруг. Конденсатори застосовують і в інших, не електротехнічних, галузях техніки та промисловості (у медицині, фотографічній техніці тощо).

Різноманітність галузей застосування зумовлює велике розмаїття конденсаторів. Поряд із мініатюрними конденсаторами, що мають масу меншу,

конденсатора, оскільки енергія будь-яких заряджених тіл зосереджена в електричному полі, створюваному цими тілами.

Під час розрядження конденсатора напруга  $U$  на його обкладках змінюється прямо пропорційно заряду  $q$  конденсатора:  $C = \frac{q}{U} \Rightarrow U = \frac{1}{C} q$ , тому графік залежності  $U(q)$  має вигляд, поданий на рис. 44.4.

Уявно розділимо увесь заряд конденсатора на маленькі «порції»  $\Delta q$  і будемо вважати, що під час втратиожної такої «порції» напруга на конденсаторі не змінюється. Таким чином отримаємо ряд смужок. Площа  $S'$ ожної смужки дорівнює до

бутку двох її сторін, тобто:  $S' = \Delta q U' = A'$ , де  $U'$  — напруга, за якої конденсатор утрачав дану «порцію» заряду  $\Delta q$ ;  $A'$  — робота, яку виконає поле під час втрати конденсатором заряду  $\Delta q$ .

Зрозуміло, що повна робота, яку виконає поле під час зменшення заряду конденсатора від  $q_0$  до 0, визначається площею кольорового трикутника. Отже,

$$A = \frac{q_0 U_0}{2}. \text{ Урахувавши, що } q_0 = C U_0, \text{ отримаємо: } A = \frac{C U_0^2}{2}, \text{ або } A = \frac{q_0^2}{2C}.$$

З іншого боку, ця робота дорівнює зменшенню енергії електричного поля конденсатора від  $W_p$  до нуля:  $A = W_p - 0 = W_p$ .

Таким чином, енергія  $W_p$  зарядженого до напруги  $U$  конденсатора, який має електроемність  $C$  і заряд  $q$ , дорівнює:

$$W_p = \frac{q U}{2} = \frac{C U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

ніж грам, а розміри порядку кількох міліметрів, існують конденсатори масою кілька тонн і заввишки більші за людський зріст. Ємність сучасних конденсаторів може становити від часток пікофарада до сотень міліфарадів, а робоча напруга може бути в межах від кількох вольтів до кількох сотень кіловольтів. Конденсатори можна класифікувати за такими ознаками та властивостями:

- за призначенням — незмінної та змінної ємності;
- за формою обкладок — плоскі, сферичні, циліндричні та ін.;
- за типом діелектрика — повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні та ін.



### Підбиваємо підсумки

• Електроємність  $C$  відокремленого провідника дорівнює відношенню електричного заряду  $q$  провідника до його потенціалу  $\phi$ :  $C = \frac{q}{\phi}$ . Одиниця електроємності в СІ — фарад (Ф).

Електроємність конденсатора, який має заряд  $q$  і напругу між обкладками  $U$ , дорівнює:  $C = \frac{q}{U}$ . Електроємність плоского конденсатора обчислюють за формулою  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ .

Для одержання необхідної ємності конденсатори з'єднують в батареї.

Фізична величина	Вид з'єднання конденсаторів	
	послідовне	паралельне
Заряд	$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$	$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$
Напруга	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$
Ємність	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

• Енергію зарядженого конденсатора можна обчислити за формулами:

$$W_p = \frac{CU^2}{2}; \quad W_p = \frac{q^2}{2C}; \quad W_p = \frac{qU}{2}.$$

• Конденсатори класифікують за призначенням (незмінної та змінної ємностей); за формою обкладок (плоскі, сферичні, циліндричні); за типом діелектрика (повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні).



### Контрольні запитання

- Що називають електроємністю відокремленого провідника? Якою є її одиниця?
- Що таке конденсатор? Для чого він призначений?
- Для чого простір між обкладками конденсатора заповнюють діелектриком?
- Від чого залежить електроємність конденсатора?
- За якою формулою розраховують електроємність плоского конденсатора?
- Як обчислити електроємність батареї, яка складається з конденсаторів, з'єднаних послідовно? з'єднаних паралельно?
- За допомогою яких формул розраховують енергію зарядженого конденсатора?
- Назвіть галузі застосування конденсаторів. Наведіть приклади.
- Які типи конденсаторів вам відомі?



### Вправа № 44

- Напруга між обкладками плоского конденсатора дорівнює 12 В. Заряд конденсатора 60 мКл. Яку електроемність має конденсатор? Чому дорівнює його енергія? Як зміниться енергія конденсатора, якщо, не змінюючи напруги між його обкладками, вдвічі збільшити відстань між ними?
- Чотири однакові конденсатори з'єднані в одному випадку паралельно, а в другому — послідовно. У якому випадку ємність батареї конденсаторів більша й у скільки разів?
- Визначте ємність батареї конденсаторів (рис. 1). Ємність кожного конденсатора дорівнює  $C$ .
- Плоский повітряний конденсатор після зарядження відключили від джерела напруги та занурили в гас. Як зміниться енергія конденсатора? Діелектрична проникність гасу — 2,1.
- Два конденсатори ємностями 1 і 2 мкФ з'єднані послідовно і приєднані до джерела, напруга на виході якого становить 120 В. Визначте напругу між обкладками першого конденсатора; другого конденсатора.
- Конденсатор, заряджений до напруги 100 В, з'єднали паралельно з конденсатором такої самої ємності, але зарядженим до 200 В. Яка напруга встановиться між обкладками конденсаторів?
- Відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора збільшили від 5 до 12 мм. На скільки змінилася енергія конденсатора, якщо напруга на конденсаторі 180 В? Площа пластини — 174 см<sup>2</sup>.
- Між клемами  $A$  і  $B$  приєднано конденсатори ємностями  $C_1 = 2$  мкФ і  $C_2 = 1$  мкФ (рис. 2). Обчисліть ємність батареї конденсаторів.

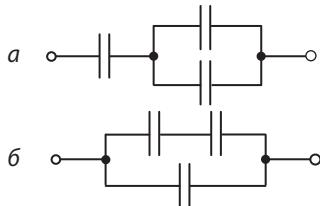


Рис. 1

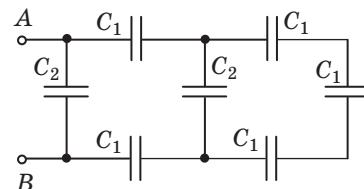


Рис. 2

- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про історію створення конденсатора і технології створення сучасних конденсаторів.

### Фізика і техніка в Україні



Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка заснований 18 серпня 1930 р. як Інститут інженерів сільськогосподарського будівництва. Первим ректором інституту (1930–1934) був Дмитро Іванович Іляшенко. У 1961 р. навчальний заклад переименовано на Інженерно-будівельний інститут, у 1994 р. — на Полтавський технічний університет, а в 2002 р. йому надано статус національного. У червні 1997 р. навчальному закладу надано ім'я Юрія Кондратюка (Олександра Шаргяя).

Сьогодні понад 10 тисяч студентів навчаються за 42 спеціальностями на 8 факультетах університету. Найбільшою популярністю користуються факультети архітектури, будівельний, електромеханічний, нафти, газу та природокористування, інформаційних та телекомунікаційних технологій і систем.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ IV «ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ»

1. Ви поглибили свої знання про електричне поле.

Електричне поле — форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

2. Ви довели, що електричне поле має енергію, за рахунок якої сили, що діють з боку поля на електричний заряд, виконують роботу:

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

Робота сил однорідного поля:  $A = Eqd$

по замкненій траєкторії  
 $A = 0$

Робота сил поля точкового заряду:  $A = \frac{kQq}{\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

3. Ви дізналися про фізичні величини, які характеризують електричне поле.

### Характеристики електричного поля

#### Силова

Напруженість:  $E = \frac{\vec{F}}{q}; \quad [E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Ам}}$

Для поля точкового заряду:  $E = \frac{k|q|}{\epsilon r^2}$

#### Енергетична

Потенціал:  $\varphi = \frac{W_p}{q}; \quad [\varphi] = 1 \text{ В}$

Для поля точкового заряду:  $\varphi = \frac{kq}{\epsilon r}$

4. Ви згадали, як графічно зображують електричне поле.

5. Ви згадали, як електричне поле впливає на речовину, дізналися, як речовина впливає на електричне поле.

Провідники:  $E = E_0 - E' = 0$

Діелектрики:  $E = E_0 - E'; \quad \epsilon = \frac{E_0}{E}$

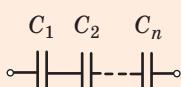
6. Ви довідалися про конденсатори, про те, що їх класифікують за призначенням, формою обкладок і типом діелектрика; дізналися про електроемність конденсатора ( $C$ ), енергію конденсатора ( $W$ ).

$C = \frac{q}{U};$  для плоского конденсатора:  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$

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

### Види з'єднання конденсаторів

#### Послідовне

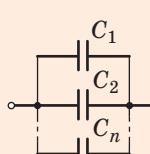


$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$

$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$

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

#### Паралельне



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

$U_1 = U_2 = \dots = U_n$

$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ І «ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ»

**Завдання 1.** На шовковій нитці висить металева кулька, заряд якої  $+20 \text{ нКл}$ , а маса  $2 \text{ г}$ . Під нею на деякій відстані розташували таку саму кульку, але із зарядом  $-4 \text{ нКл}$ .



**Завдання 2.** Електрон, рухаючись у вакуумі вздовж силової лінії електричного поля, проходить між двома точками з різницею потенціалів 400 В. Після проходження цієї різниці потенціалів швидкість руху електрона стає рівною нулю.

- (1 бал) Яка із сил (рис. 1) показує напрямок сили, що діє на електрон?
  - а)  $\vec{F}_1$ ;      б)  $\vec{F}_2$ ;      в)  $\vec{F}_3$ ;      г)  $\vec{F}_4$ .
  - (2 бали) Чому дорівнює робота, виконана електричним полем?
  - (3 бали) Визначте, якою була швидкість руху електрона, коли він потрапив в електричне поле, а також відстань, яку подолав електрон, якщо напруженість електричного поля становить  $8 \text{ кВ/м}$ .
  - (4 бали) Чому буде дорівнювати зміна кінетичної енергії електрона, якщо він потрапить в електричне поле з тією самою початковою швидкістю, але перпендикулярно до силових ліній поля? Час руху електрона в полі  $2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ . Напруженість поля  $300 \text{ В/м}$ .

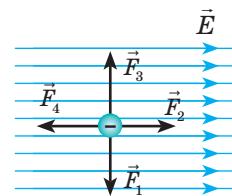


Рис. 1

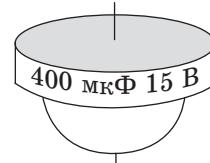


Рис. 2

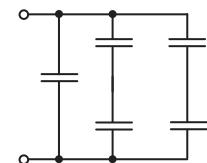


Рис. 3

1. (2 бали) Яка напруженість електричного поля в точці, розміщений посередині між цими зарядами?

**Завдання 4.** На рис. 2 зображені слюдяний конденсатор, на корпусі якого зазначено значення емності та робочої напруги.

1. (2 бали) Визначте модуль заряду однієї з обкладок зарядженого до робочої напруги конденсатора.

а) 6 мКл; б) 27 мКл; в) 38 кКл; г) 400 мКл.

2. (3 бали) Як зміниться енергія конденсатора, якщо його напруги, а потім приєднати до нього паралельно такий конденсатор?

3. (3 бали) Визначте електроемність батареї таких конденсаторів, як показано на рис. 3.

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, виконані правильно, і полічіть суму балів. Поділіть цю суму на два. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



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

## СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА

Багато хто з вас користується мобільним телефоном та іншими електричними пристроями, тож сподіваємось, що принаймні на побутовому рівні ви знаєте про електрику дещо більше, ніж викладено в розділі IV. А тут ітиметься про порівняно нове джерело електричної енергії — сонячні батареї — і про ті зміни, які вони внесуть у наше життя в найближчому майбутньому.

Енергія Сонця — це основа життя на Землі. Але протягом майже всієї своєї історії людство не мало засобів безпосередньо перетворювати сонячну енергію для своїх потреб і було змушене користуватися, так би мовити, вторинними продуктами: дровами, торфом, вугіллям тощо. Тільки на межі XIX і XX ст. було відкрито *зовнішній фотоефект* — виникнення електричного струму в певних матеріалах під впливом сонячного випромінювання. І знадобилося майже сто років, щоб фотоелектричні перетворювачі, які зараз називають *сонячними батареями* (*сонячними панелями*), «народилися» як промисловість. Бурхливий розвиток їх практичного застосування відбувається на ваших очах. Так, потужність сонячних панелей у світі в 2001 р. складала приблизно 700 МВт (це практично потужність досить невеликої Дністровської ГЕС), а от у 2016 р. уже йшлося про 230 ГВт — це майже в 5 разів більше, ніж уся енергетика України.

Зараз багато пишуть про майбутнє вичерпання світових запасів нафти та

газу. Чи існує подібна загроза для розвитку сонячної енергетики? Кількість енергії, яку Земля одержує від Сонця за 10 хвилин, приблизно така сама, що її споживає людство за рік. Тож виходить, що для заміщення інших джерел енергії треба «засіяти» сонячними батареями не всю поверхню Землі, а тільки її досить невелику частину, яка приблизно дорівнює території Австрії або Чехії. Тож найближчими сторіччями «вичерпання сонячних ресурсів» не буде. Але технічно неможливо, принаймні зараз, сконцентрувати всю енергетику планети в одному невеликому регіоні, тому інженери пішли іншим шляхом: для розміщення сонячних батарей вони застосовують наявні елементи споруд. Найвідоміший приклад — сонячні батареї на даху (рис. 1). Більш сучасне рішення — *«інтегровані батареї»*, тобто сонячні батареї, поєднані з конструктивними елементами будівлі — вікнами, цеглою, черепицею.

А ще згадаємо Ілона Маска, американського підприємця та винахідника. Автомобіль «Тесла» на електричній тязі започаткував нову еру в автомобілебудуванні. Найбільше вражає, мабуть, вантажівка на електричній тязі (рис. 2). Із повним вантажем (36 тонн) цей автомобіль за 20 с розганяється до швидкості 100 км/год і може перевезти цей вантаж без підзарядки на відстань 800 км.

Сонячна енергетика завершує своє «дитинство». Яким буде її доросле життя?

Рис. 1



Рис. 2



## ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ І ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

### Вступ

**№ 2.** 1. 8 %. 2. 1) 2,1 мм; 0,1 мм; 0,2 мм; 9,5 %; 2)  $2,1 \pm 0,2$  (мм). **№ 3.** 1.  $Hi$ ;  $ni$ ;  $ni$ ; так. 3.  $a_x=2$ ;  $a_y=3$ ;  $b_y=0$ ;  $c_x=3$ ,  $c_y=-4$ ;  $d_x=-4$ ,  $d_y=0$ ;  $l_x=0$ ,  $l_y=-3$ ;  $s_x=-2$ ,  $s_y=-5$ .

### Розділ I. Механіка

#### Частина 1. Кінематика

**№ 4.** 1. Одновимірну; двовимірну; двовимірну; тривимірну; тривимірну. 2. Сонце. 3. Із собою. 4. 31,4 м; 28,3 м. 5. Пряма; параболічна. **№ 5.** 1. 11 м/с; 9 м/с. 2. 167 м; 174 м. 3. I чверть: 0,94 м/с, 0,85 м/с; II чверть: 0,47 м/с, 0,42 м/с; півкола: 0,6 м/с, 0,4 м/с. 4.  $x_1(t) = -700 + 5t$ ,  $x_2(t) = 500 - 20t$ ,  $x_3(t) = 1400 - 25t$ ;  $t_{21} = 48$  с,  $x_{21} = -460$  м;  $t_{31} = 70$  с,  $x_{31} = -350$  м;  $t_{23} = 180$  с,  $x_{23} = -3100$  м. 5. Курс літака має відхилитися від північного напрямку на кут  $7,7^\circ$  на захід; 2 год 1 хв. 6. 40 км/год.

**№ 6.** 1. 1)  $-4 \text{ м/с}^2$ , 20 м/с; 2) 5 с. 2. 1) 18,75 м; 2) 5 с; 3)  $v_x = 2,5 + 0,5t$ ,  $s_x = 2,5t + 0,25t^2$ ; 4) 3,5 м/с, 3 с; 6) 4 с. 3. 2)  $s_x = -18t + 0,9t^2$ . 4. 10 с; 120 м. **№ 7.** 1. Прискорення однакове; 6 м/с. 2. 5 м; 10 м; 0. 3. 1) a) 20 м/с; б) 3,5 с; в) 35 м; 2) 35 м. 4. 1) 4,16 с, 31,6 м/с; 2) 2,16 с, 31,6 м/с; 3) 3 с, 30 м/с. **№ 8.** 2. У точці  $B$  — найбільше, у точці  $A$  — найменше. 3. 3,3 м/с $^2$ . 4. У 1,5 разу. 5. 6,3 м/с; 150 обертів. 6. 1200 разів. 7. 1675 км/год.

#### Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1

1. г. 2. б. 3. в. 4. б. 5. 1 хв 38 с. 6. 24 м; 4,8 м/с 7. 2 м; 7 м/с. 8. 3,2 м. 9. 7 м/с;  $\approx 1,2$  м. 10.  $x = -1 + 4t - t^2$ ;  $v_x = 4 - 2t$ .

#### Частина 2. Динаміка і закони збереження

**№ 9.** 3. СВ1: 20 м, 2 с, 10 м/с $^2$ , 20 м/с; СВ2: 36 м, 2 с, 10 м/с $^2$ , 25 м/с. 5. а) 6 Н; направлена вліво; б) 4 Н; направлена вліво; в) 10 Н; направлена вздовж напрямку сили  $F_2$ . **№ 10.** 2.  $Hi$ . 3. 270 г. 4. У 1,44 разу. 7. 1) 4200 Н; 2) 960 Н. **№ 11.** 3. 1) збільшиться втрічі; 2) зменшиться в 9 разів. 4. У 49 разів. 5.  $2 \cdot 10^{30}$  кг. 6. 5520 с;  $\approx 6800$  км. 7. 42 000 км. **№ 12.** 1. 20 см. 2. У точці  $A$ ; у точці  $B$ ; у точці  $B$ . 3. 100 кН/м. 4. 1) 10 Н; 2) 5 Н; 3) 15 Н. 5. У точці  $A$  — 20 кН; у точці  $B$  — 15,5 кН; у точці  $B$  — 22,25 кН; 114 км/год. 6. 3,2 м/с. 7. 3 кН. **№ 13.** 4. 25 м; 2,5 с. 5. 20 с. 6. 43 Н. **№ 14.** 1. а) стійка; б) нестійка; в) байдужа. 4. 100 Н. 5.  $39^\circ$ . **№ 15.** 2. 500 Дж. 3. 1800 МДж. 4. 1-А, 2-В, 3-Г. 5. 150 кДж. 6.  $E_k \uparrow$  у 2 рази. 7. 420 кДж; 42 кВт. **№ 16.** 1.  $Hi$ . 3. 2 м. 5. 15 м. 6. 1 м/с. 7.  $-250$  Дж; 63 см. **№ 17.** 1. Імпульс не зміниться. 2. 1) 0; 2) 19,6 кг; 3) 3 м/с. 3. 3 кг або 330 г.

#### Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2

1. в. 2. г. 3. 1-Д, 2-В, 3-А, 4-Б. 4. г. 5. б. 6. г. 7. 30 мДж, 10 см. 8. 0,25. 9. 0,3 м/с $^2$ . 10. 5,4 Дж.

#### Частина 3. Механічні коливання і хвилі

**№ 19.** 2. 1) 0,5 Гц, 3,14 рад/с; 2) 5; 3) 30 см. 3. 0,4 м; 3 с; 0,33 Гц;  $\approx 0,8$  м/с,  $\approx 1,8$  м/с $^2$ . 4.  $x(t) = 0,1 \cos(2\pi t)$  (м). 5. 1) 2 м, 4 с, 0,25 Гц,  $x(t) = 2 \cos(\pi t/2)$  (м); 2) 5 см, 0,4 с, 2,5 Гц,  $x(t) = 0,05 \sin(5\pi t)$  (м). **№ 20.** 1. 1)  $T$  не зміниться; 2)  $T \downarrow$ ; 3)  $T \downarrow$ . 2.  $Hi$ . 3. Годинник почне поспішати; годинник незначно відставатиме. 4. 2,3 кг. 5. 2 мм; 1 м. 6. 1)  $10\pi$  рад/с, 0,2 с; 2) 4,9 кН/м; 3) 98 Дж; 4) 0,14 м; 49 Дж; 49 Дж. **№ 21.** 2.  $Hi$ . 3. 20 м/с. 4. 160 Н/м. 5. 20 м/с. **№ 22.** 1. 1-Б, 2-Г, 3-А. 2. 20 мм; поздовжня. 3. 1) 0,2 см, 1,6 м, 0,94 Гц; 2) справа наліво; 3)  $A$  — вниз,  $C$  — вгору; 4)  $A$  — вниз,  $B$  — вгору,  $C$  — вгору. **№ 23.** 1. 0,77 м; 3,4 м; 11,4 м. 2. 600 м. 3.  $\lambda \downarrow$  у 4,4 разу. 4. Завдяки дифракції звукових хвиль.

## Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 3

2. в. 2. б. 3. 1-Д, 2-Б, 3-А, 4-В. 4. 1-Г, 2-Б, 3-А. 5. а. 6.  $\bar{v}_A \uparrow$ ,  $a_A=0$ ;  $\bar{v}_B \downarrow$ ,  $\bar{a}_B \uparrow$ .  
 7.  $x=0,1\sin 10\pi \cdot 8$ .  $l=1,25$  м;  $s=5$  см. 9.  $\approx 2,1$  с. 10.  $k=8$  Н/м;  $v_{\max} = 31,4$  см/с;  $E_p=5$  мДж.

## Розділ II. Елементи спеціальної теорії відносності

- № 24. 1. с. 2. с. 4. а) 0,94с; б) 420 000 км. 3. 0,95с; 0,38с. № 25. 1.  $\tau=3,3$  року.  
 2.  $l=2,5$  м. 3. У 2 рази. 4.  $\approx 5,6 \cdot 10^{14}$  кг.

## Розділ III. Молекулярна фізика і термодинаміка

## Частина 1. Молекулярна фізика

- № 26. 1.  $\approx 1,7 \cdot 10^{-9}$  м. 2.  $3,34 \cdot 10^{25}$ . 3. а)  $M=28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=35,7$  моль,  $m_0=4,65 \cdot 10^{-26}$  кг; б)  $M=44 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=22,7$  моль,  $m_0=7,3 \cdot 10^{-26}$  кг; в)  $M=16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=62,5$  моль,  $m_0=2,66 \cdot 10^{-26}$  кг. 4. 190 млрд. № 27. 2. Дифузією; у теплому.  
 3. Дифузії. 6. Так; недовго. № 28. 1. 2) а)  $p \uparrow$ ,  $V \downarrow$ ,  $v_{\text{кв}} \downarrow$ ,  $m_0$  не зміняться,  $\rho \uparrow$ ;  
 б)  $p \downarrow$ ,  $V \uparrow$ ,  $t \downarrow$ ,  $\bar{v}_{\text{кв}} \downarrow$ ,  $m_0$  не зміниться,  $\rho \downarrow$ . 2.  $p \uparrow$  в 4 рази. 3.  $p \uparrow$  в 9 разів 4.  $1,3 \text{ м}^3$ .  
 5.  $8,4 \cdot 10^{-21}$  Дж. № 29. 2. 184 К;  $-128$  F. 3.  $p \uparrow$  в 4 рази;  $\bar{v}_{\text{кв}} \uparrow$  у 2 рази. 4.  $3,6 \cdot 10^{27}$ .  
 № 30. 1.  $p \uparrow$  у 8 разів. 2.  $\approx 20$  м. 3. 2,14 атм. 5.  $p \downarrow$ . № 31. 5. Можна. 6. Ні. № 32. 4. 40 %;  
 $7,76 \text{ г/м}^3$ ; 776 г; 194 г. № 33. 2.  $5,82 \cdot 10^{-5}$  м. 3. 3,2 Па. 4. 0,041 Н/м. 5. 0,21 мДж.  
 № 34. 2. б — із монокристалічної; в — із полікристалічної. № 35. 3. 1) 0,1 МПа;  
 2) 0,1; 3) 1 МПа; 4) 0,28 мм. 4. 22 кН. 5. 1 — для крихкого; 2 — пластичного; 3 — пружного.

## Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 1

1. в. 2. г. 3. г. 4. а. 5. в. 6. 1-В, 2-Д, 3-Г, 4-Б. 7.  $2,9 \cdot 10^{22}$ . 8.  $p \downarrow$ ,  $T \downarrow$ ,  $V \uparrow$ . 9. Не випаде.  
 10. 1,2 мм;  $h \downarrow$  на 1,2 см;  $h \downarrow$  на 1,4 см;  $h \uparrow$  на 3,6 см.

## Частина 2. Основи термодинаміки

- № 36. 1.  $-14$  кДж. 2. 225 Дж; 9 К. 3. а)  $U \downarrow$  на 3750 Дж; б)  $U \uparrow$  на 10 500 Дж; в)  $U \uparrow$  на 15 000 Дж; г)  $U$  не зміниться. 4. 2,9 кг. 5. 190 кг. № 37. 2. 3,9 кДж. 3.  $\approx 3,3$  кДж.  
 4.  $-500$  кДж; 450 кДж. 5.  $A_{1'2'3'} > A_{123}$ . № 38. 1.  $\Delta U = -15$  Дж;  $A = 0$ . 2.  $\Delta U = -3,6$  Дж;  
 $A = -2,4$  Дж. 3. Під час ізобарного розширення. 4. а)  $5,6 \cdot 10^2$  Дж; б) 1,9 кДж;  
 в)  $2,6 \cdot 10^2$  Дж; г) віддавав, 475 кДж. 5. 8,3 кДж;  $\Delta U = 21$  кДж. № 39. 1. Не можна.  
 2. 50 %; 67 %;  $\frac{n-1}{n}$ . 3. 90 Дж; 37,5 %. 4.  $\approx 500$  г.

## Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 2

1. в. 2. в. 3. г. 4. б. 5. 1-Г; 2-Д; 3-А; 4-Б. 6. 1,5 кДж; 0. 7. 1,0 кДж; 1,5 кДж.  
 8. 143 г. 9. 750 Дж; 0; 1875 Дж; 29 %.

## Розділ IV. Електричне поле

- № 40. 2.  $\downarrow$  в 4 рази. 3. а)  $\uparrow$  в 1,8 разу; б)  $\downarrow$  в 1,25 разу. № 41. 1. 10 мкН. 2. 250 Н/Кл.  
 3. а) електрон — прямолінійно,  $v_{\text{ел}} \uparrow$ , протон — прямолінійно,  $v_{\text{пр}} \downarrow$ ; б) параболічною  
 траєкторією,  $v_{\text{ел}} \uparrow$ ,  $v_{\text{пр}} \uparrow$ . 4. 5400 Н/Кл. 5. а) 0; б)  $\frac{4kg}{a^2}$ . 6.  $E_A = 8kq/a^2$ ;  $E_B = E_C = \frac{32kg}{9a^2}$ .

- № 42. 1.  $W_p \downarrow$  у 2 рази;  $W_p \uparrow$  в 4 рази. 2.  $-3$  мкДж;  $A \uparrow$ . 3.  $-0,9$  Дж; ні. 4. 4 нКл.  
 5. 2,275 кВ. № 43. 3. Так. 4. 367 нКл. 5. 0,46 мкКл. № 44. 1. 5 мкФ, 360 мкДж,  $W \downarrow$   
 у 2 рази. 2. При паралельному  $C \uparrow$  в 16 разів. 3.  $(2/3)C$ . 4.  $W \downarrow$  у 2 рази. 5. 80 В і 40 В.  
 6. 150 В. 7.  $W \downarrow$  на 0,29 мкДж. 8.  $\approx 1,6$  мкФ.

## Завдання для самоперевірки до розділу IV

- Завдання 1. 1. а. 2. 6 мм. Завдання 2. 1. г. 2.  $-6,4 \cdot 10^{-17}$  Дж. 3.  $1,2 \cdot 10^7$  м/с, 5 см.  
 4.  $5,1 \cdot 10^{-19}$  Дж. Завдання 3. 1. 0. Завдання 4. 1. а. 2.  $W \downarrow$  в 4 рази. 3. 800 мкФ.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

- A** Абсолютний нуль температури 178  
Автоколивання 121  
Агрегатні стани речовини 169  
Аморфні речовини 169, 202  
Амплітуда коливань 119, 122  
Анізотропія 204  
Атом 160
- Б** Броунівський рух 165  
Вага тіла 75  
Величина  
— векторна 17  
— скалярна 17  
— фізична 11  
Взаємодія гравітаційна 66  
Видовження 73  
— відносне 208  
Випаровування 184  
Випромінювання 217  
Висота звуку 141  
Відносність механічного руху 23  
Вільне падіння 40  
Вологість 192, 194
- Г** Гігрометр 193  
Гучність звуку 142
- Д** Двигун 230, 232  
Деформація 72, 207  
Дифракція 138  
Дифузія 166  
Діелектрики 253  
Діелектрична проникність 255  
Довжина хвилі 136  
Дослід  
— Міллікена 238  
— Штерна 167
- Е** Еквіпотенціальна поверхня 247  
Електризація 238  
Електроємність 257, 258  
Енергія  
— внутрішня 216  
— кінетична 94  
— конденсатора 260  
— механічна 98  
— поверхнева 196  
— повна механічна 100  
— потенціальна 98  
— — взаємодії точкових зарядів 246  
— — піднятого тіла 99  
— — пружно деформованого тіла 100  
— спокою 157
- Еталон 12  
Ефект  
— близнюків 157  
— скорочення довжини  
релятивістський 155  
— уповільнення часу  
релятивістський 156
- Ж** Жорсткість 74
- З** Заземлення 253
- Закон**  
— Амонтон — Кулона 82  
— Бернуллі 112  
— Бойля — Маріотта 181  
— всесвітнього тяжіння 67  
— Гука 73, 208  
— Гей-Люссака 182  
— додавання переміщень 30  
— додавання швидкостей  
— — класичний 30, 150  
— — релятивістський 153  
— збереження електричного заряду 239  
— збереження імпульсу 105  
— збереження повної механічної  
енергії 101  
— інерції 56  
— Кулона 239  
— Ньютона  
— — другий 62  
— — перший 58  
— — третій 63  
— термодинаміки  
— — другий 229, 231  
— — перший 224  
— Шарля 183  
Заряд 237, 239  
Захист електростатичний 253  
З'єднання конденсаторів 258, 259  
Зміщення 119  
Змочування 199
- І** Ідеальний газ 172  
Ізопроцеси 180–182  
Ізотропія 202  
Імпульс 104  
Індукція електростатична 251  
Інертність 61  
Інерція 57  
Інтерференція 138  
Інфразвук 144
- Й** Йон 161
- К** Капіляр 200  
Кипіння 189  
Кількість речовини 162  
Кількість теплоти 218  
Коливання 119–122  
Конвекція 217  
Конденсатор 257  
Конденсація 187  
Концентрація молекул 172
- Л** Лінії напруженості 243
- М** Маса 61  
Матеріальна точка 22  
Маятник 125, 127  
Механіка 20  
Модель фізична 10  
Момент сили 88  
Монокристал 204
- Н** Напруга механічна 208  
Напруженість 242

- Насичена пара 187
- Невагомість 76
- Необоротні процеси 231
- О** Основне рівняння МКТ 176
- Основні положення МКТ 160
- П** Пароутворення 184
- Переміщення 22
- Період
  - коливань 119, 126, 127
  - обертання 48
- Поверхневий натяг 197, 198
- Подія 152
- Поле
  - гравітаційне 66
  - електричне 241
  - електростатичне 241
  - потенціальне 245
- Полікристал 204
- Поліморфізм 203
- Постулати СТВ 151, 152
- Потенціал 246
- Потужність 95
- Похиби вимірювань 13, 14
- Принцип
  - відносності Галілея 58, 150
  - суперпозиції 243
- Прискорення 33
  - вільного падіння 40
  - доцентрове 50
  - рівноприскореного руху 33
- Провідники 51
- Психрометр 194
- Р** Резонанс 131
  - акустичний 143
- Рівновага динамічна 187
- Рівновага тіла 87, 89
- Рівняння
  - гармонічних коливань 122
  - Клапейрона 184
  - координат тіла 23
  - — під час вільного падіння 41
  - — рівномірного прямолінійного руху 27
  - — рівноприскореного прямолінійного руху 36
  - нерозривності струменя 111
  - стану ідеального газу (Менделєєва — Клапейрона) 184
- Рідкі кристали 205
- Різниця потенціалів 247
- Робота
  - газу 221
  - електростатичного поля 245, 246
  - механічна 92
- Рух
  - механічний 20
  - оберточний 87
  - поступальний 87
  - реактивний 105
  - рівномірний по колу 48
  - рівномірний прямолінійний 26
- рівноприскорений прямолінійний 33
- тіла, кинутого горизонтально 44
- тіла, кинутого під кутом до горизонту 45
- С** Сила 60
  - консервативна 98
  - натягу підвісу 74
  - нормальні реакції опори 75
  - опору середовища 83
  - підйомальна 112
  - поверхневого натягу 197
  - пружності 73
  - тертя 80–82
  - тяжіння 68
- Система відліку 21, 57
- Спеціальна теорія відносності 151
- Стан теплової рівноваги 175
- Т** Тембр звуку 142
- Температура 175
  - абсолютна 177
- Теорема
  - про кінетичну енергію 94
  - про потенціальну енергію 100
- Тепловий двигун 232
- Теплоємність 218
- Теплопередача 217
- Теплопровідність 217
- Термометр 176
- Тиск
  - газу 172
  - Лапласа 200
- Точка роси 193
- Траєкторія руху 22
- У** Ультразвук 144
- Умови рівноваги 88
- Ф** Фаза коливань 122
  - Фазові стани речовини 169, 203
- Формула
  - Гюйгенса 129
  - Ейнштейна 157
  - хвилі 136
- Фронт хвилі 137
- Х** Хвиля 136–138, 141
- Холодильний пристрій 233
- Ц** Центр мас 87, 116
- Цикл Карно 231
- Ч** Частота коливань 119
- Число Авогадро 166
- Ш** Швидкість
  - кутова 49
  - лінійна 48, 49
  - миттєва 29
  - перша космічна 70
  - рівномірного прямолінійного руху 26
  - рівноприскореного прямолінійного руху 34
  - середня векторна 28
  - середня квадратична 172
  - середня шляхова 28
- Шкала температурна 175, 176
- Шлях 22

## ЗМІСТ

Передмова . . . . .	3
Орієнтовні теми проектів, рефератів і повідомлень, експериментальних досліджень . . . . .	4

### Вступ

§ 1. Зародження і розвиток фізики як науки . . . . .	5
§ 2. Методи наукового пізнання. Фізичні величини та їх вимірювання. Невизначеності вимірювань . . . . .	10
§ 3. Скалярні і векторні величини . . . . .	16

### Розділ I. Механіка

#### Частина 1. Кінематика

§ 4. Основна задача механіки. Абетка кінематики . . . . .	20
§ 5. Швидкість руху. Середня і миттєва швидкості. Закони додавання переміщень і швидкостей . . . . .	26
§ 6. Рівноприскорений прямолінійний рух. Прискорення . . . . .	33
§ 7. Вільне падіння і криволінійний рух під дією незмінної сили тяжіння . . . . .	39
§ 8. Рівномірний рух матеріальної точки по колу . . . . .	47
Лабораторна робота № 1 . . . . .	52
Лабораторна робота № 2 . . . . .	53
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 1 . . . . .	54
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1 . . . . .	55

#### Частина 2. Динаміка і закони збереження

§ 9. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона . . . . .	56
§ 10. Сила. Маса. Другий і третій закони Ньютона . . . . .	60
§ 11. Гравітаційне поле. Сила тяжіння. Перша космічна швидкість . . . . .	66
§ 12. Сила пружності. Вага тіла . . . . .	72
§ 13. Сила тертя . . . . .	80
§ 14. Рівновага тіл. Момент сили . . . . .	87
§ 15. Механічна робота. Кінетична енергія. Потужність . . . . .	92
§ 16. Потенціальна енергія. Закон збереження механічної енергії . . . . .	98
§ 17. Імпульс тіла. Реактивний рух. Пружне і непружнє зіткнення . . . . .	104
§ 18. Рух рідини і газу. Підіймальна сила крила . . . . .	111
Лабораторна робота № 3 . . . . .	115
Лабораторна робота № 4 . . . . .	116
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 2 . . . . .	117
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2 . . . . .	118

#### Частина 3. Механічні коливання і хвилі

§ 19. Види механічних коливань . . . . .	119
§ 20. Математичний і пружинний маятники. Енергія коливань . . . . .	125
§ 21. Резонанс . . . . .	131
§ 22. Механічні хвилі . . . . .	134
§ 23. Звукові хвилі . . . . .	141
Лабораторна робота № 5 . . . . .	146
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 3 . . . . .	147
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 3 . . . . .	148
Енциклопедична сторінка . . . . .	149

## Розділ II. Елементи спеціальної теорії відносності

§ 24. Постулати спеціальної теорії відносності. Релятивістський закон додавання швидкостей.....	150
§ 25. Наслідки постулатів спеціальної теорії відносності .....	155
Підбиваємо підсумки розділу II. ....	159

## Розділ III. Молекулярна фізика і термодинаміка

### Частина 1. Молекулярна фізика

§ 26. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії .....	160
§ 27. Рух і взаємодія молекул .....	165
§ 28. Основне рівняння МКТ ідеального газу .....	171
§ 29. Температура. Температурна шкала Кельвіна .....	175
§ 30. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроцеси .....	179
§ 31. Пароутворення і конденсація. Насичена і ненасичена пара. Кипіння .....	186
§ 32. Вологість повітря. Точка роси.....	192
§ 33. Поверхневий натяг рідини. Змочування. Капілярні явища.....	196
§ 34. Будова та властивості твердих тіл. Анізотропія кристалів. Рідкі кристали .....	202
§ 35. Механічні властивості твердих тіл .....	206
Лабораторна робота № 6 .....	212
Лабораторна робота № 7 .....	213
Підбиваємо підсумки розділу III. Частина 1.....	214
Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 1.....	215

### Частина 2. Основи термодинаміки

§ 36. Внутрішня енергія і способи її зміни .....	216
§ 37. Робота в термодинаміці .....	221
§ 38. Перший закон термодинаміки. Адіабатний процес .....	224
§ 39. Принцип дії теплових двигунів. Холодильна машина .....	228
Підбиваємо підсумки розділу III. Частина 2.....	235
Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 2.....	236

## Розділ IV. Електричне поле

§ 40. Абетка електростатики .....	237
§ 41. Електричне поле.....	241
§ 42. Робота з переміщення заряду в електростатичному полі. Потенціал .....	245
§ 43. Провідники і діелектрики в електричному полі .....	251
§ 44. Електроемність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора .....	257
Підбиваємо підсумки розділу IV .....	263
Завдання для самоперевірки до розділу IV .....	264
Енциклопедична сторінка.....	265
Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки .....	266
Алфавітний покажчик .....	268

*Рубрика «Фізика і техніка в Україні»:* Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Богословського (9), А. М. Лулька (32), О. К. Антонов (65), Державне підприємство «Антонов» (97), Інститут проблем міцності ім. Г. С. Пісаренка НАНУ (140), І. Я. Померанчук (174), Інститут монокристалів НАНУ (206), Національний університет «Львівська політехніка» (250), Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка (262)

## Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчаль- ний рік	Стан підручника на початку року	Стан підручника в кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

### Навчальне видання

*БАР'ЯХТАР Віктор Григорович*

*ДОВГИЙ Станіслав Олексійович*

*БОЖИНОВА Фаїна Яківна*

*КІРЮХІНА Олена Олександрівна*

### «ФІЗИКА

**(рівень стандарту, за навчальною програмою  
авторського колективу**

**під керівництвом Локтєва В. М.)»**

**підручник для 10 класу закладів загальної середньої освіти**

**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 20.07.2018 р. Формат 70×100/16.**

**Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.**

**Ум. друк. арк. 22,1. Обл.-вид. арк. 21,2. Тираж 268596 прим. Зам. № 2408-2018**

**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) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.**

**Надруковано у друкарні ТОВ «ТРИАДА-ПАК»,**

**пр. 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**