

Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев

# ФІЗИКА

П І Д Р У Ч Н И К

10  
клас

**Рівень стандарту**

*Рекомендовано  
Міністерством освіти і науки України*

Харків  
«Гімназія»  
2010

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Г34

*Рекомендовано*

*Міністерством освіти і науки України*

*(наказ від 08.06.2010 № 544)*

**Наукову експертизу проводив**

*Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова*

*Національної академії наук України*

**Психолого-педагогічну експертизу проводив**

*Інститут педагогіки*

*Національної академії педагогічних наук України*

*Експерти, які здійснювали експертизу:*

- В. В. Кумайгородський, Чупирянське НВО «Загальноосвітня школа І–ІІ ст. — дитячий садок» Білоцерківського району Київської обл., вчитель, вчитель-методист*
- І. В. Грийцаровська, Зборівська ЗОШ І–ІІІ ст. № 1 Тернопільської обл., вчитель, старший вчитель*
- Г. В. Мачушинець, Районний методичний кабінет відділу освіти Ківерцівської райдержадміністрації Волинської обл., методист*
- Л. І. Ятвецька, Одеський обласний інститут удосконалення вчителів, науково-методична лабораторія, завідувач лабораторії*

**Генденштейн Л. Е.**

Г34      **Фізика. 10 кл. : підруч. для загальноосвіт. навч. закладів : рівень стандарту / Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев. — Х. : Гімназія, 2010. — 272 с. : іл.**

**ISBN 978-966-474-098-9.**

**УДК 373.167.1:53**

**ББК 22.3я721**

© Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев, 2010

© ТОВ ТО «Гімназія», оригінал-макет,  
художнє оформлення, 2010

**ISBN 978-966-474-098-9**



## ДО ВЧИТЕЛЯ ТА УЧНЯ

---

- Підручник призначено для вивчення фізики в 10-му класі за рівнем *стандарту* (2 уроки на тиждень).
- Автори прагнули подати фізику як живу науку, що є частиною загальної культури: наведено багато *прикладів* прояву та застосування фізичних законів у навколишньому житті, відомостей з історії фізичних *відкриттів*, подано ілюстрований опис фізичних дослідів.
- *Чітка структура підручника* полегшує розуміння навчального матеріалу. У тексті виділено головне, а в кінці параграфів і розділів зібрано висновки для узагальнення, повторення та конспекту.
- Виклад ведеться у формі *діалогу*: багато розділів починаються із *запитань*, відповідями на які є зміст цих розділів.
- Один параграф підручника розраховано приблизно на *один навчальний тиждень*.

1. Зародження та розвиток фізики як науки
2. Роль фізичного знання в житті людини й розвитку суспільства
3. Методи наукового пізнання
4. Фізика і техніка в Україні

### 1. ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТОК ФІЗИКИ ЯК НАУКИ

Слово «фізика» походить від давньогрецького слова «природа». Так назвав першу відому нам наукову працю про природні явища давньогрецький учений Арістотель, який жив у 4-му столітті до нашої ери.

Книга Арістотеля служила основним «підручником фізики» протягом майже двох тисячоліть. Наступний важливий крок у розвитку фізики зробив великий італійський учений Галілео Галілей (1564–1642). Його вважають основоположником фізики в її сучасному розумінні — як *дослідної* (експериментальної) науки. Галілей спростував на дослідах деякі важливі положення вчення Арістотеля.

Фізика досліджує механічні, теплові, електромагнітні, світлові явища, а також будову речовини. Завданням фізики, як і інших наук, є пошук *законів*, за допомогою яких можна пояснювати та передбачати широке коло явищ.

### 2. РОЛЬ ФІЗИЧНОГО ЗНАННЯ В ЖИТТІ ЛЮДИНИ Й РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА

Навчившись передбачати фізичні явища і керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, що розширили можливості науки, техніки та мистецтва, об'єднала всіх людей Землі надійними системами зв'язку.

Чудеса сучасної техніки з'явилися насамперед завдяки фізиці: без знання фізичних законів неможливо проектувати й використовувати машини, механізми, прилади, космічні апарати тощо.

Однак справа не тільки в «практичній» цінності фізики: знання фізики необхідне кожному з нас, щоб задовольнити природну цікавість у розумінні навколишнього світу.

Фізичні знання та методи народжують нові науки, наприклад біофізику, геофізику, астрофізику.

### 3. МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ

#### СПОСТЕРЕЖЕННЯ, НАУКОВА ГІПОТЕЗА Й ЕКСПЕРИМЕНТ

Явища світу, що нас оточує, надзвичайно складні, адже кожне з них залежить від дуже багатьох причин. Але, уважно спостерігаючи те чи інше явище, ми зауважуємо, що якісь причини більш істотні для його протікання, а якісь — менш істотні.

Зі *спостережень* виникають припущення, що для цілого кола явищ існують певні закономірності. Такі припущення називають науковими *гіпотезами*.

Щоб перевірити гіпотезу, учені проводять *досліди* (експерименти) з метою з'ясувати, як змінюється перебіг явищ у разі зміни умов їх перебігу. Для цього створюються *спеціальні умови*. Наприклад, в експериментах з вивчення руху Галілей намагався зменшити роль тертя.

Так від *спостережень* учені переходять до *експериментів*, тобто починають «ставити запитання природі».

#### НАУКОВІ МОДЕЛІ ТА НАУКОВА ІДЕАЛІЗАЦІЯ

Для формулювання гіпотези, постановки експерименту та пояснення його результатів необхідно побудувати *модель* певного об'єкту, явища або процесу — спрощене, схематизоване уявлення, у якому виділено найбільш важливі риси. Прикладами таких моделей є *матеріальна точка* — тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, або *ідеальний газ* — такий газ, розміри молекул якого нехтувано малі, причому взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

Повністю усунути в експерименті «перешкоди», як правило, не вдається. Але за результатами експерименту іноді можна здогадатися про те, що мало б спостерігатися в «ідеальній» ситуації, тобто в разі, коли всі перешкоди було б усунуто цілком. Цю ідеальну ситуацію називають *науковою ідеалізацією*. Саме вона дозволяє побачити простоту законів, що криються за зовнішньою складністю явищ.

З прикладами наукової ідеалізації ми будемо неодноразово зустрічатися в нашому курсі.

З поняттям наукової ідеалізації пов'язане поняття *уявного експерименту*, тобто експерименту, проведеного за допомогою уяви. При цьому особливе значення має логічна несуперечність результатів уявного експерименту.



Важливим прикладом наукової ідеалізації є так зване «вільне тіло», тобто тіло, на яке не діють інші тіла. Цілком вільних тіл зазвичай не існує: навіть галактики, що віддалені одна від одної на величезну відстань, взаємодіють між собою. Однак, поставивши уявний експеримент, тобто подумки продовживши закономірність, виявлену на дослідах з реальними тілами, можна *уявити* тіло, що зовсім не взаємодіє з будь-якими іншими тілами. Роздуми про те, як рухатимуться такі тіла, привели Галілея до відкриття закону інерції.

## НАУКОВИЙ ЗАКОН І НАУКОВА ТЕОРІЯ

Коли гіпотеза про перебіг фізичних явищ підтверджується експериментом, вона стає *фізичним законом*.

Основний зміст механіки становлять три закони, сформульовані видатним англійським ученим Ісааком Ньютоном (знамениті «три закони Ньютона»), закон всесвітнього тяжіння (відкритий теж Ньютоном), а також закономірності для сил пружності та сил тертя. Для газових процесів відкрито закони, що описують залежність між тиском, об'ємом і температурою газу. Взаємодія електрично заряджених частинок, що перебувають у спокої, підпорядковується закону, відкритому французьким фізиком Шарлем Кулоном.

Сукупність законів, що описують широке коло явищ, називається *науковою теорією*. Наприклад, закони Ньютона становлять зміст класичної механіки.

Поряд із законами наукова теорія містить *означення* фізичних величин і понять, за допомогою яких формулюються закони цієї теорії. Дуже важливо, щоб усі обумовлені у фізичній теорії величини могли бути *виміряні на досліді*, оскільки справедливість фізичних законів і теорій може бути перевірено тільки дослідним шляхом.

## ПРИНЦИП ВІДПОВІДНОСТІ

Поява нової фізичної теорії не скасовує «стару» теорію, а *уточнює та доповнює* її. Однією з найважливіших вимог під час створення нових фізичних теорій є *принцип відповідності*, згідно з яким передбачення нової теорії повинні збігатися з передбаченнями «старої» теорії в межах її застосовності. Це означає, що нова теорія має включати «стару» теорію як окремий, граничний випадок. Принцип відповідності сформулював на початку 20-го століття данський фізик Нільс Бор — один із творців квантової механіки.

Так, передбачення спеціальної теорії відносності стосуються головним чином руху тіл зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла, але вони збігаються з передбаченнями класичної механіки, якщо швидкості руху тіл набагато менші від швидкості світла. Квантову механіку було розроблено для опису рухів частинок з надзвичайно малою масою (наприклад, електронів), але вона «перетворюється» на класичну, якщо маси тіл досить великі.

#### **СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ**

Сучасна фізична картина світу заснована на уявленні про те, що *речовина складається з дрібних частинок, між якими існує кілька видів фундаментальних взаємодій*. Це — сильні взаємодії, електромагнітні, слабкі та гравітаційні. У другій половині 20-го століття електромагнітні взаємодії було об'єднано зі слабкими в «електрослабку» взаємодію. Сьогодні продовжуються інтенсивні спроби побудови «великого об'єднання» — теорії, що дозволила б об'єднати усі відомі види взаємодій.

#### **4. ФІЗИКА І ТЕХНІКА В УКРАЇНІ**

Уся історія людства — це драматична історія пізнання людиною невідомого в довколишньому середовищі та спроби поставити собі на службу це невідоме. Завдяки цим спробам виникли природничі науки: астрономія, біологія, географія, хімія. Фізика з цілковитою підставою посідає серед них головне місце. Адже саме фізика впродовж століть визначала науково-технічний прогрес людства. Транспорт, енергетика, польоти в космос, сучасна електроніка — наше сучасне життя неможливе без використання досягнень фізичної науки. У майбутньому фізика напевно відіграватиме більш важливу та значну роль у розвитку людства. І судити про країну будуть по тому, якого рівня розвитку досягнула фізика в цій країні.

Наша країна може гордитися рівнем наукових досліджень, які проводяться у численних науково-дослідних центрах, рівнем технічного втілення наукових відкриттів.

Ядерна фізика і фізика плазми, фізика твердого тіла і фізика напівпровідників, сучасна електроенергетика, створення перших електронно-обчислювальних машин, авіа- і гелікоптеробудування, ракетна техніка і виробництво автомобілів, суднобудування і виробництво залізничного транспорту, сучасна техніка радіолокації — ось неповний перелік тих галузей фізики і техніки, у яких Україна є розвиненою державою.



## ЯДЕРНА ФІЗИКА

В історії людства не було наукової події, видатнішої за наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану та опанування ядерною енергією. Людина отримала у своє розпорядження могутнє джерело енергії, зосереджене в ядрах атомів.

Дослідження в галузі атомної фізики в Україні розпочалися в 1928 році, коли в Харкові, за ініціативою відомого вченого А. І. Іоффе, було створено Український фізикотехнічний інститут (УФТІ). Через кілька років після заснування інституту, у 1932 році, молоді співробітники Антон Вальтер, Георгій Латишев, Олександр Лейпунський і Кирило Синельников уперше в Європі розщепнули ядро атома — це було ядро літію (рис. В-1). У 30-х роках під керівництвом Льва Ландау в інституті починаються теоретичні дослідження атомного ядра та ядерних процесів. Квантова механіка, фізика твердого тіла, магнетизм, фізика низьких температур, фізика космічних променів, гідродинаміка, квантова теорія поля, фізика атомного ядра і фізика елементарних частинок, фізика плазми — у всіх цих галузях фізики Ландау вдалося зробити відкриття. Про нього говорили, що у «величезній будівлі фізики 20-го століття для нього не було замкнених дверей».



Рис. В-1



Ландау був нагороджений Нобелівською премією з фізики, обраний членом Лондонського королівського товариства та академій наук Данії, Нідерландів, США, Франції, Лондонського фізичного товариства. Немає у світі жодного фізика-теоретика, який не знає знаменитого «Курсу теоретичної фізики», основним автором якого був Ландау.

Дослідження взаємодії нейтронів з ядрами урану, проведені в 1939–1941 роках, свідчили про принципову можливість здійснення ланцюгової ядерної реакції і вивільнення внутрішньоядерної енергії. У 1940 році Фрідріх Ланге, Володимир Шпінель і Віктор Маслов подали заявку на винахід атомної бомби і здобуття в промислових масштабах урану.

‘Учені України внесли істотний вклад до пошуку методів отримання й використання атомної енергії в мирних цілях. Із середини 20-го століття дослідження атомного ядра проводяться в Інституті фізики і Інституті ядерних досліджень України (Київ). Результати цих досліджень — ядерні реактори і системи управління ядерними процесами, а також атомна промисловість.

На сьогодні в Україні більше ніж половина електроенергії виробляється на чотирьох атомних електростанціях: Запорізькій, Рівненській, Хмельницькій і Південно-Українській АЕС.

Запорізька АЕС — найпотужніша атомна електростанція в Європі і третя за потужністю у світі.

### **ФІЗИКА ПЛАЗМИ**

Плазма — це газоподібний стан речовини, за якого значна частина атомів йонізовані, тобто розпалися на позитивно заряджені йони та електрони. Дослідження плазми почалися ще в 19 столітті, коли розвиток вакуумної техніки дав змогу фізикам виготовити перші газорозрядні трубки. Дослідження газового розряду — а це один з видів плазми — привели до відкриття рентгенівських променів і електрона, створення нових джерел світла та апаратів з плазмової обробки поверхонь.

У земних умовах плазму можна зустріти хіба що в газорозрядних трубках і плазмових телевізорах, а у Всесвіті практично вся речовина знаходиться в стані плазми. Опанування плазми дозволить людині отримати нові джерела енергії, двигуни для космічних апаратів.

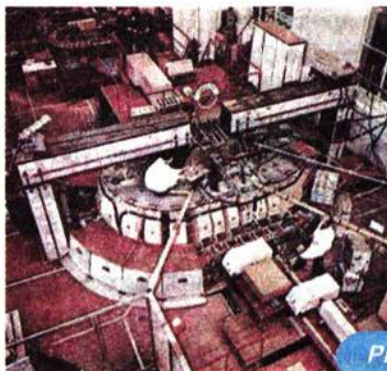


Рис. В-2

В Україні є декілька наукових центрів, у яких ведуться роботи з дослідження плазми. Передусім це Інститут фізики плазми (м. Харків) та Інститут фізики (м. Київ).

Плазма викликає інтерес у вчених здебільшого тому, що саме з нею пов'язано майбутнє енергетики Землі — термоядерний синтез. Саме термоядерний синтез є джерелом енергії зір. Щоб на Землі запалити зорю, потрібно нагрівати до десятків мільйонів градусів водневу плазму. Зробити це можна лише в спеціальних установках за допомогою магнітних і електричних полів. В Інституті фізики плазми працює установка «Ураган», у якій удалося створити рукотворне Сонце (рис. В-2). І хоча від цієї установки ще далеко до створення промислового термоядерного реактора, результати, отримані на установці «Ураган», поза сумнівом, будуть покладені в основу конструкції майбутніх термоядерних реакторів.

### **ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА І ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ**

Сучасну фізику недаремно називають фізикою твердого тіла. Успіхи математичної та експериментальної фізики кінця 19-го і початку 20-го століть створили умови для бурхливого розвитку всіх напрямів фізики твердого тіла: фізики кристалів, теорії металів, фізики напівпровідників.

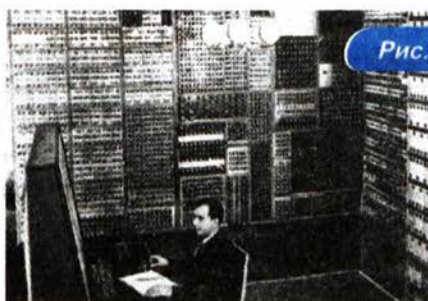
В Україні дослідження в галузі фізики твердого тіла і фізики напівпровідників почали проводитися в другій половині 20-го століття. У Києві було засновано Інститут фізики напівпровідників, який сьогодні є провідним науковим центром. В Інституті проводяться дослідження напівпровідникових структур, створюються нові матеріали та прилади мікроелектроніки.



У Харківському університеті на кафедрі теоретичної фізики і в теоретичному відділенні Харківського фізико-технічного інституту Ілля Ліфшиц розробив електронну теорію металів — теоретичні основи сучасної електроніки. Крім того, І. М. Ліфшиц є одним із творців сучасної динамічної теорії твердого тіла і фізики квантових кристалів.

### ПЕРШІ КОМП'ЮТЕРИ

У Києві в одній з лабораторій Інституту електротехніки наприкінці 40-х років було створено першу в СРСР і континентальній Європі електронно-обчислювальну машину, прообраз сучасних комп'ютерів (рис. В-3). Потрібно було вирішувати досить багато завдань, які вимагали швидких і складних обчислень. У першу чергу це управління польотами балістичних і космічних ракет. Надалі лабораторію було перетворено на Інститут кібернетики, який створив ряд комп'ютерних систем. Найбільше досягнення Інституту — створення сучасних суперкомп'ютерів для вирішення задач ядерної фізики, управління складними системами, проведення космічних досліджень.



### ГЕЛІКОПТЕРО-І АВІАБУДУВАННЯ

Україна має право пишатися Ігорем Сікорським і Олегом Антоновим. Ігор Сікорський всесвітньо відомий як творець першого серійного гелікоптера, а з Олегом Антоновим пов'язане створення в Україні сучасної авіаційної промисловості, повного циклу виробництва літаків, яким можуть похвалитися не більш як десять країн світу. У Сполучених Штатах Америки, куди Сікорський емігрував у 1919 році, він створив свої найкращі гелікоптери. І сьогодні у всьому світі знають гелікоптери Сікорського. Їх використовують як у цивільних, так і у військових цілях не лише у Сполучених Штатах Америки, але й у багатьох країнах світу.



Олег Антонов набув світової популярності, обіймаючи посаду директора Київського конструкторського бюро літакобудування. Він створив всесвітньо відомі літаки Ан-2, Ан-10, Ан-12, Ан-22 «Антей», Ан-24. Останнє творіння нашого знаменитого земляка — найбільший транспортний літак Ан-124 «Руслан», що випускають серійно.

У 1984 році ім'ям Олега Антонова було названо Київський авіаційний науково-технічний комплекс (АНТК) зі створення та виробництва літаків — АНТК ім. Антонова. Найкращим пам'ятником великому конструктору стало створення надважкого транспортного літака Ан-225 «Мрія» (рис. В-4), призначеного для перевезення радянського космічного корабля «Буран». АНТК ім. Антонова розробив і випустив понад 100 типів літаків цивільного і військового призначення. І сьогодні Авіаційний науково-технічний комплекс ім. Антонова належить до найвідоміших авіабудівних фірм світу.

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Наприкінці 18-го століття в Україні було побудовано великі кораблебудівні заводи, поблизу яких виникли міста Миколаїв і Херсон. Спочатку на цих заводах будували дерев'яні парусні військові кораблі та цивільні судна. З розвитком техніки заводи розширювалися: дерев'яні парусні судна замінилися на пароплави, які мали сталеві корпуси.

У 19–20-му століттях кораблебудування України бурхливо розвивалося — наша країна перетворилася на одну з найбільших кораблебудівних держав Європи. Під кінець



20-го століття на 11 машинобудівних і приладобудівних заводах Миколаєва, Херсона, Керчі, Севастополя, Києва, Одеси було зосереджено близько 10 % усього обсягу світового кораблебудування. Гордістю українського суднобудування були і залишаються ракетні й авіаносні крейсери, великі протичовнові кораблі та транспортні судна, криголами. Серед кораблебудівних заводів України — найбільший у Європі Чорноморський суднобудівельний завод неподалік від Миколаєва (рис. В-5). Ми впевнені, що вам, сьогоденнім старшокласникам, вдасться вписати нові сторінки в славний літопис українських кораблебудівників.

### РАКЕТОБУДУВАННЯ

Уперше бойові ракети в Європі застосували в 1515 році запоріжці під командуванням гетьмана Богдана Ружинського: вони атакували начиненими порохом ракетами татарську кінноту кримського хана Мелік-Гірея, унаслідок чого він зазнав нищівної поразки, хоча мав кількісну перевагу над запоріжцями. Але незабаром козаки втратили секрет «ракетної зброї», бо всі ракетники, що брали участь у військовій кампанії, загинули в подальших битвах.



«Якби у нас ракетна зброя була раніше, то хтозна, чи посмів би Бонапарт ступити на нашу землю. А якби й почав свою варварську навалу, то, можливо, його б швидше зупинили. І тоді сиділи б разом з нами багато хоробрих, котрі загинули в боях». Ці слова належать нашому землякові та знаменитому військовому винахідникові Олександру Засядько. Він вів свій родовід від тих самих запоріжців-ракетників.

Народився Олександр Засядько в 1779 році в селищі Лютеньці Гадяцького району Полтавської області. Здобувши військову освіту, він брав участь у війнах з турками і французами. Вийшовши у відставку, Олександр Засядько починає винаходити бойові порохові ракети. Він сконструював пускові станки, які давали змогу вести залповий вогонь шістьма ракетами. Це був прообраз знаменитої «катюші», одним із винахідників якої був теж наш земляк, полтавчанин Юрій Победоносцев.

Ракетна зброя Олександра Засядько відіграла вирішальну роль під час облоги потужної турецької фортеці Браїлов (у Вінницькій області) весною 1828 року. Перед вирішальним штурмом по фортеці було зроблено залп бойовими фугасними ракетами. Вони зі страшним свистом летіли до фортеці й там вибухали. Стало видно як удень. Після короткої перерви ракетний залп повторили, але вже запальними снарядами. Фортеця впала.

Серед тих, хто зміг передбачити освоєння космосу ракетними літальними апаратами і створити перші космічні апарати, є імена винахідників і вчених, які теж тісно пов'язані з Україною: Микола Кибальчич, Юрій Кондратюк (Олександр Шаргей), Сергій Корольов, Михайло Янгель, Валентин Глушко та інші.

Сьогодні славу Олександра Засядько поширюють і визначають світовий рівень у ракетно-космічній науці й техніці Дніпропетровський ракетно-космічний комплекс, до складу якого входить КБ «Південне» і завод «Південмаш». Тут конструюють і виробляють ракети, які виводять на навколоземну орбіту супутники зв'язку і дослідні лабораторії, тому Україна є космічною державою. З єдиного у світі морського космодрому «Sea Launch» стартують лише українські ракети «Зеніт» (рис. В-6). У своєму класі це найнадійніші та досконаліші космічні ракети у світі.





Наша розповідь про науку й техніку в Україні, звичайно ж, є неповною. Можна було б згадати одного з творців теорії броунівського руху, львів'янина Мар'яна Смолуховського, дослідника електричних і магнітних явищ, одесита Миколу Умова, винахідника методу просвітлення оптики, тернопільця Олександра Смакулу, дослідника рентгенівського випромінювання, а також тернопільця Івана Пулюя. Згадаймо також про перший суцільнозварний міст через Дніпро в Києві та його розробника Євгена Патона, про кращий танк Другої світової війни Т-34 і його творців, конструкторів та інженерів Харківського паровозобудівного заводу Михайла Кошкіна та Олександра Морозова.

# 1 КІНЕМАТИКА

---

**§ 1. Механічний рух**

**§ 2. Прямолінійний рівномірний рух**

**§ 3. Прямолінійний рівноприскорений рух**

**§ 4. Приклади розв'язування задач**

**§ 5. Рівномірний рух по колу**

## § 1. МЕХАНІЧНИЙ РУХ

---

1. Основне завдання механіки
2. Фізичне тіло та матеріальна точка
3. Система відліку. Відносність руху
4. Траскторія, шлях і переміщення
5. Векторні величини у фізиці

### 1. ОСНОВНЕ ЗАВДАННЯ МЕХАНІКИ

Механіка вивчає механічний рух та взаємодію тіл.

*Механічним рухом* називають зміну з часом положення тіла відносно інших тіл.

Часто для стислості ми називатимемо механічний рух просто «рухом».

Приклади механічного руху: рух зір і планет, потягів, літаків, автомобілів та космічних кораблів.

*Основне завдання механіки* полягає в тому, щоб визначити положення тіла в будь-який момент часу відносно інших тіл.

Для розв'язання основного завдання механіки треба знати *початкове положення тіла та його швидкість у початковий момент часу*. Крім того, якщо швидкість тіла змінюється з часом, треба знати, як саме вона змінюється.

Як ми побачимо далі, швидкість тіла змінюється внаслідок дії на це тіло інших тіл. Закони, що визначають, як змінюються швидкості тіл, і є основними законами механіки. Але щоб сформулювати закони механіки й навчитися їх застосовувати, треба спочатку навчитися описувати положення тіла та його рух.

Опис руху тіл становить зміст першого розділу механіки, який називають *кінематикою*.

### 2. ФІЗИЧНЕ ТІЛО ТА МАТЕРІАЛЬНА ТОЧКА

Як ви вже знаєте, у фізиці тілом (точніше, фізичним тілом) називають будь-який предмет: це може бути, наприклад, планета, автомобіль чи навіть піщинка.



У багатьох задачах для опису руху тіла достатньо задати рух тільки *однієї* його точки. У такому разі тіло подумки заміняють однією точкою.

Тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають *матеріальною точкою*.

Матеріальна точка є найпростішою моделлю тіла, використання якої значно спрощує опис його руху.

Далі ми розглядатимемо в основному задачі, у яких тіло можна вважати матеріальною точкою.

### КОЛИ ТІЛО МОЖНА ВВАЖАТИ МАТЕРІАЛЬНОЮ ТОЧКОЮ?

Чи можна вважати тіло матеріальною точкою, залежить не від розмірів тіла («велике» воно чи «маленьке»), а від поставленої задачі. Тому те саме тіло в одних задачах може розглядатися як матеріальна точка, а в інших — ні.

Так, тіло можна вважати матеріальною точкою, якщо *розміри тіла малі порівняно з відстанню, пройденою тілом*, оскільки в цьому випадку розбіжність у русі різних точок тіла є несуттєвою. Розглянемо приклади.

**Рух літака.** Якщо треба знайти час перельоту літака між двома містами, літак можна вважати матеріальною точкою, оскільки розміри літака набагато менші, ніж відстань між містами (рис. 1.1).



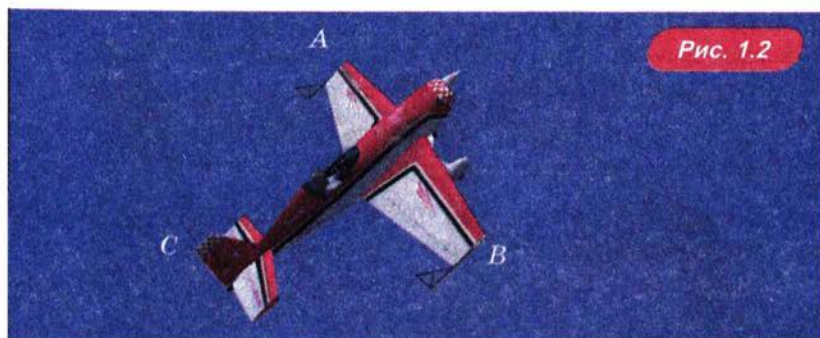


Рис. 1.2

Якщо ж потрібно описати рух літака під час виконання фігур вищого пілотажу, то слід урахувувати, що при цьому різні точки літака рухаються по-різному: літак може похитувати крилами, піднімати й опускати ніс. Для опису руху літака треба при цьому задавати положення *декількох* точок літака (наприклад, A, B, C на рис. 1.2), тобто в цьому випадку літак не можна вважати матеріальною точкою.

**Рух Землі.** Розглядаючи рух Землі навколо Сонця, Землю можна вважати матеріальною точкою, адже розміри Землі набагато менші, ніж відстань від Землі до Сонця (рис. 1.3). Розглядаючи силу, що діє на Землю з боку Сонця, Землю також часто можна вважати матеріальною точкою.



Рис. 1.3

Якщо ж нас цікавить положення різних точок Землі в різні моменти під час її добового обертання, Землю не можна розглядати як матеріальну точку (рис. 1.4).

Тіло можна вважати матеріальною точкою також за умови *поступального руху* тіла, тобто під час такого руху, коли всі точки тіла рухаються однаково (при цьому будь-який відрізок, що з'єднує дві точки тіла, залишається паралельним самому собі), оскільки під час поступального



Рис. 1.4



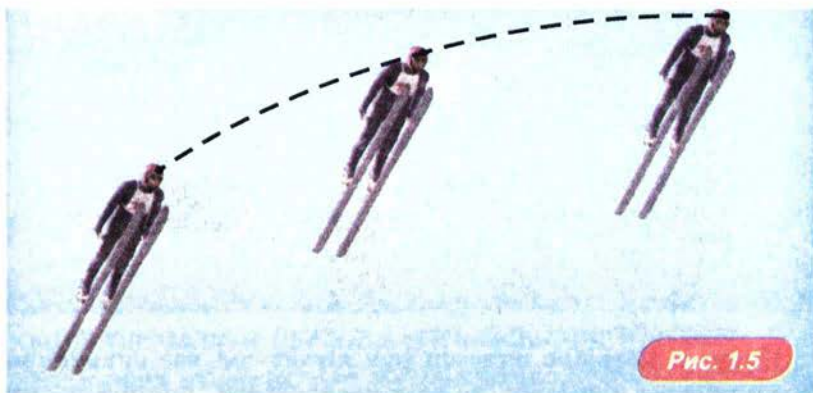


Рис. 1.5

руху для опису руху тіла достатньо задати рух тільки однієї точки тіла. Розглянемо приклад.

**Політ лижника з трампліна.** Під час стрибка з трампліна лижник у польоті рухається практично поступально. Тому для опису руху лижника достатньо задати рух тільки однієї його точки (рис. 1.5). Отже, описуючи рух лижника, людину можна вважати матеріальною точкою.

### 3. СИСТЕМА ВІДЛІКУ. ВІДНОСНІСТЬ РУХУ

Коли описують рух тіла, то завжди — явно чи неявно — мають на увазі рух цього тіла *відносно якогось іншого тіла*.

Тіло, відносно якого розглядають рух усіх тіл у даній задачі, називають *тілом відліку*.

Часто за тіло відліку приймають Землю. Наприклад, коли говорять: «Автомобіль їде зі швидкістю 100 км/год», мають на увазі швидкість автомобіля відносно Землі. Але якщо говорять, що пасажир їде по вагону зі швидкістю 4 км/год, мають на увазі швидкість пасажирів відносно вагона, тобто тілом відліку є вагон.

Іноді без прямої вказівки на тіло відліку обійтися просто не можна: наприклад, фраза «ракета летить зі швидкістю 10 км/с» буде незрозумілою, якщо не зазначити, відносно якого тіла розглядається рух ракети — Землі, Сонця чи іншої ракети.

Положення тіла в даний момент часу задають за допомогою *системи координат*, пов'язаної з тілом відліку. А оскільки рух тіла характеризується зміною положення тіла з часом, для опису руху потрібен також *годинник*.



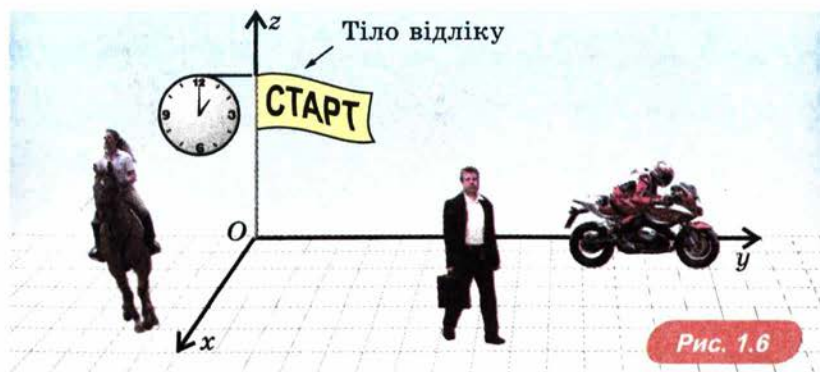


Рис. 1.6

Тіло відліку та пов'язані з ним система координат і годинник утворюють *систему відліку* (рис. 1.6).

#### 4. ТРАЕКТОРІЯ, ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ

Лінію в просторі, по якій рухається тіло, називають *траєкторією руху тіла*.

Траєкторія є уявною лінією, але якщо тіло залишає слід під час руху, то ця лінія стає видимою. Наочний приклад — слід, який залишає літак (рис. 1.7) або катер (рис. 1.8). Цей слід показує траєкторію літака в системі відліку, пов'язаній із Землею. У першому випадку траєкторія тіла *прямолінійна*, у другому — *криволінійна*.

Якщо тіло повернулося в початкову точку, траєкторію називають *замкнутою*.

Наприклад, якщо ви вранці вишли з дому, а ввечері повернулися додому, траєкторія вашого руху за день є замкнутою.

Довжину траєкторії називають *шляхом*, пройденим тілом.

Шлях є скалярною величиною, зазвичай його позначають літерою  $l$ .



Рис. 1.7



Рис. 1.8



Рис. 1.9

Зверніть увагу: шляхом вважають суму довжин усіх ділянок траєкторії, у тому числі тих, що накладаються одна на одну. Наприклад, якщо автомобіль зробив три повні кола по кільцевому шосе, то пройдений ним шлях у три рази більший за довжину кола.

Щоб визначити, куди перемістилося тіло в даний момент із початкової точки, задають

*переміщення тіла* — напрямлений відрізок, проведений з початкового положення тіла в його положення в даний момент часу (рис. 1.9).

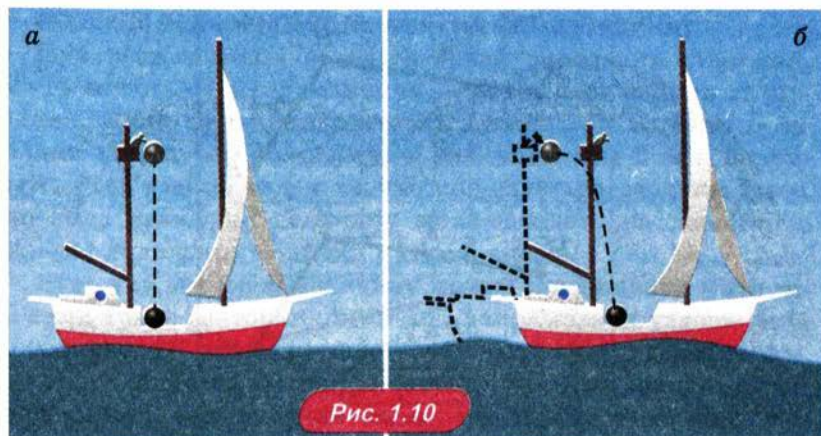
Переміщення є *векторною* величиною, зазвичай його позначають  $\vec{s}$ ; модуль переміщення позначають  $s$ . Далі ми розглянемо, як використовують векторні величини у фізиці.

### ЧИ ЗАЛЕЖИТЬ ТРАЄКТОРІЯ ВІД ВИБОРУ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ?

Так, залежить: наприклад, в одній системі відліку траєкторія руху тіла може бути прямолінійною, а в іншій — криволінійною. Тому від вибору системи відліку залежить і шлях, і переміщення тіла.

**Приклад (із книги Галілея).** Нехай з вершини щогли корабля, що пливе, на його палубу падає ядро. У системі відліку, пов'язаній із кораблем, траєкторія руху ядра — прямолінійний відрізок (рис. 1.10, а). З точки ж зору спостерігача, який стоїть на березі, ядро мало початкову горизонтальну швидкість, що дорівнювала швидкості корабля. Тому в системі відліку, пов'язаній із берегом, траєкторія руху одного й того самого ядра криволінійна (рис. 1.10, б). Легко побачити, що пройдений ядром шлях і переміщення ядра у двох розглянутих системах відліку також різні.

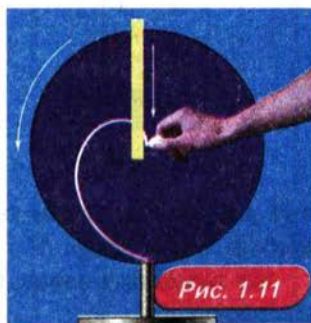




## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Закріпимо картонний або фанерний диск так, щоб він міг обертатися навколо горизонтальної осі (рис. 1.11).

Розкрутимо диск, піднесемо до нього рейку (не торкаючись диска) і проведемо уздовж рейки грудочкою крейди, щоб крейда залишила слід на диску. У системі відліку, пов'язаній із Землею, траєкторія грудочки крейди прямолінійна — крейда рухається вздовж рейки. Однак на диску крейда викреслює спіраль, що показує траєкторію руху тієї ж грудочки крейди в системі відліку, пов'язаній з диском.



## 5. ВЕКТОРНІ ВЕЛИЧИНИ У ФІЗИЦІ

У фізиці використовують багато векторних величин. Такими величинами є, наприклад, переміщення, швидкість, сила. Розглядаючи багато задач, треба вміти виконувати різні дії з векторними величинами. Розглянемо тут додавання векторних величин на прикладі додавання переміщень.

Нехай літак перелетів з міста  $M$  до міста  $H$ , а звідти — до міста  $K$ . На рисунку 1.12,  $\vec{s}_1$  вектором позначено переміщення літака з  $M$  у  $H$ , а вектором  $\vec{s}_2$  — переміщення літака

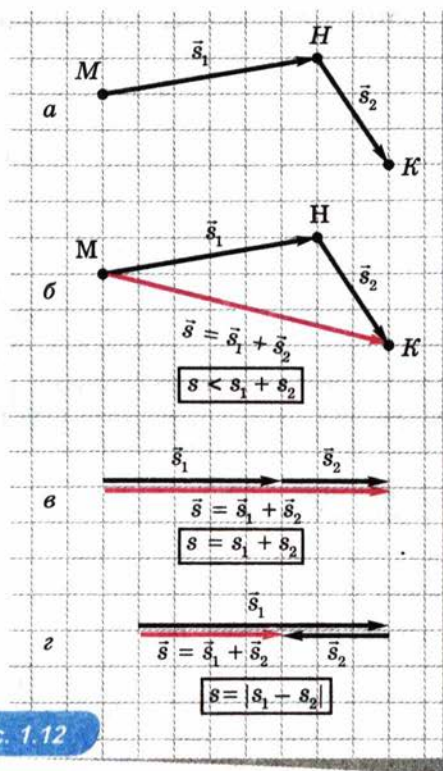


Рис. 1.12

з  $H$  у  $K$ . Результатом двох переміщень є переміщення  $\vec{s}$  — це вектор, що з'єднує  $M$  і  $K$ .

Ми виконали зараз *додавання векторів* за «правилом трикутника».

Щоб за цим правилом знайти суму двох векторів, треба початок другого вектора з'єднати з кінцем першого вектора (рис. 1.12, а). Тоді сумою цих двох векторів є вектор, початок якого збігається з початком першого вектора, а кінець — з кінцем другого вектора (рис. 1.12, б).

За допомогою «правила трикутника» можна додавати також вектори, напрямлені вздовж однієї прямої (рис. 1.12, в, г). Щоправда, у цьому випадку справжній трикутник не виходить, бо всі вектори лежать на одній прямій. Зверніть увагу: у цьому випадку рівність  $s = s_1 + s_2$  має місце тільки тоді, коли вектори-доданки напрямлені однаково (рис. 1.12, в). Якщо ж вектори-доданки напрямлені протилежно, то  $s = |s_1 - s_2|$  (рис. 1.12, г).

## ПРОЕКЦІЇ ВЕКТОРНОЇ ВЕЛИЧИНИ НА ОСІ КООРДИНАТ

При розв'язуванні задач зазвичай складають рівняння, що зв'язують фізичні величини, а потім розв'язують ці рівняння. Якщо величини векторні, доводиться «стежити» не тільки за модулем кожної такої величини, але й за її напрямом. Розв'язання задач значно спрощується завдяки тому, що *одну векторну величину можна задати за допомогою кількох скалярних величин у такий спосіб.*

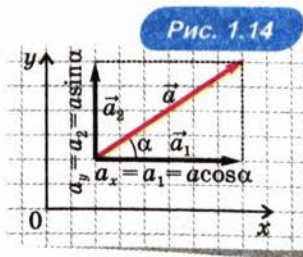
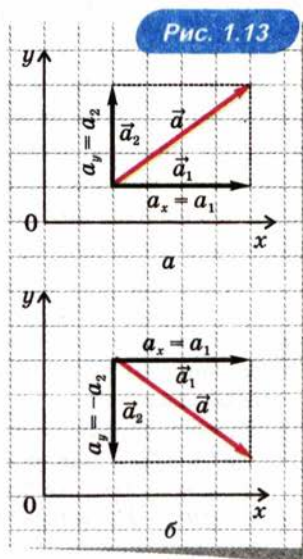
Будь-яку векторну величину можна представити у вигляді суми трьох векторних величин, напрямлених уздовж осей координат. Ці векторні величини називають її *складовими*. А кожну складову векторної величини можна охарактеризувати *числом*: модуль цього числа дорівнює модулю складової, а знак числа визначається напрямом складової. Якщо вона напрямлена в додатному напрямі осі координат, то це число додатне, а якщо у від'ємному — то від'ємне. Це число називають *проекцією даної векторної величини на відповідну координатну вісь*<sup>1</sup>.

Проекції векторної величини  $\vec{a}$  на осі координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  позначають  $a_x$ ,  $a_y$  і  $a_z$ . Вони мають ті самі одиниці, що й модуль величини  $\vec{a}$ . Наприклад, одиниці проекції переміщення — метри, а проекції швидкості — метри за секунду. На рис. 1.13 показано, як знаходити проекції векторної величини, заданої на площині. На рис. 1.13, а обидві проекції вектора  $\vec{a}$  додатні, а на рис. 1.13, б проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $x$  додатна, а на вісь  $y$  — від'ємна.

Ще раз звертаємо увагу на те, що *знак проекції може бути як позитивним, так і негативним.*

Виразимо проекції векторної величини  $\vec{a}$ , заданої на площині, через її модуль  $a$  і кут  $\alpha$  між напрямом  $\vec{a}$  і віссю  $x$ .

Як видно з рис. 1.14,  $a_x = a \cos \alpha$ ,  $a_y = a \sin \alpha$ . Оскільки складові век-



<sup>1</sup> Проекції вектора в курсі геометрії називають координатами вектора.



торної величини і сама векторна величина утворюють прямокутний трикутник, модуль векторної величини виражається через її проекції за допомогою формули  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ .

При додаванні векторних величин їхні проекції додаються.

### ЯК ПОВ'ЯЗАНІ ПРОЕКЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ ТІЛА З ЙОГО КООРДИНАТАМИ?

Для наочності обмежимося рухом на площині.

Нехай тіло з точки з координатами  $x_0, y_0$  перемістилося в точку з координатами  $x, y$  (рис. 1.15). Тоді переміщення  $\vec{s}$  — це вектор, проведений із точки з координатами  $x_0, y_0$  у точку з координатами  $x, y$ . Отже,  $s_x = x - x_0$ ,  $s_y = y - y_0$ . Таким чином,  $x = x_0 + s_x$ ,  $y = y_0 + s_y$ .

Зверніть увагу: у цих формулах стоїть знак «плюс» незалежно від того, у якому напрямі рухалося тіло — у додатному напрямі осі (рис. 1.15, а) чи у від'ємному (на рис. 1.15, б тіло рухається у від'ємному напрямі осі  $y$ ).

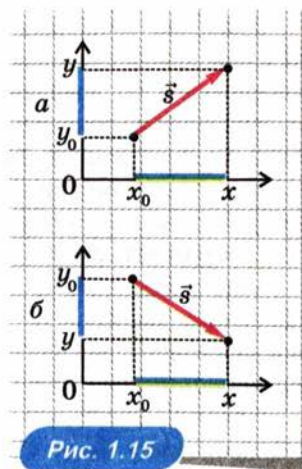


Рис. 1.15

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Механічним рухом називають зміну з часом положення тіла відносно інших тіл.
- Основне завдання механіки полягає в тому, щоб визначити положення тіла в будь-який момент часу. Для розв'язання основного завдання механіки треба знати початкове положення тіла, його швидкість у початковий момент часу й те, як швидкість змінюється з часом.
- Тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають матеріальною точкою. Тіло можна вважати матеріальною точкою, якщо розміри тіла малі порівняно з відстанню, пройденою тілом, а також у разі, коли тіло рухається поступально.
- Тіло, відносно якого розглядають рух усіх тіл у даній задачі, називають тілом відліку.
- Тіло відліку та пов'язані з ним система координат і годинник утворюють систему відліку.
- Лінію в просторі, по якій рухається тіло, називають траєкторією руху тіла.
- Довжину траєкторії називають шляхом, пройденим тілом.



- Переміщення тіла — напрямлений відрізок, проведений з початкового положення тіла в його положення в даний момент часу.
- Форма траєкторії, шлях та переміщення тіла залежать від вибору системи відліку.

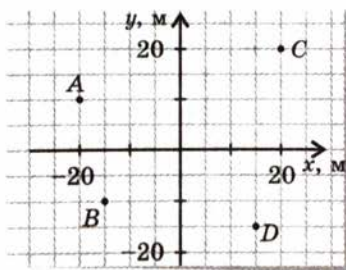
## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Наведіть приклади задач, коли ваше власне тіло можна вважати матеріальною точкою, а коли — ні.
2. Наведіть приклади задач, у яких спортсмена можна розглядати як матеріальну точку і в яких не можна.
3. Навіщо потрібна система відліку? З чого вона складається?
4. Що приймають за тіло відліку, коли говорять: а) автомобіль їде зі швидкістю 100 км/год; б) Земля рухається по своїй орбіті зі швидкістю 30 км/с?
5. Чи може траєкторія руху перетинати себе? Наведіть приклади, що підтверджують вашу відповідь.
6. Чим відрізняється шлях від переміщення? Чи може шлях під час руху тіла зменшуватися?

### Другий рівень

7. Як рухається тіло, якщо модуль переміщення дорівнює шляху, пройденому тілом?
8. Яка траєкторія руху тіла, якщо його переміщення дорівнює нулю, а шлях нулю не дорівнює?
9. Хлопчик їде на велосипеді по прямолінійній ділянці горизонтального шляху. Намалюйте в зошиті траєкторію руху сідла велосипеда відносно шляху; педалей велосипеда.
10. На рисунку показано послідовні положення  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  через рівні проміжки часу бджоли, яка літає лугом. Перенесіть рисунок у зошит і накресліть вектори переміщень бджоли за кожний з цих проміжків.



## § 2. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОМІРНИЙ РУХ

1. Швидкість прямолінійного рівномірного руху
2. Графіки прямолінійного рівномірного руху
3. Середня швидкість

### 1. ШВИДКІСТЬ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ

Найпростіший вид руху — прямолінійний рівномірний рух.

*Прямолінійним рівномірним рухом* називають рух, під час якого тіло за будь-які рівні проміжки часу здійснює однакові переміщення.

Прямолінійним рівномірним рухом є, наприклад, рух автомобіля по прямому шосе, коли спідометр «застигає» на одному показанні, скажімо «60 км/год».

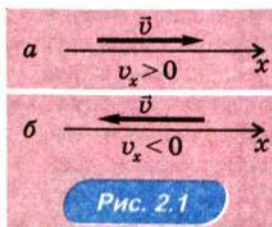
Швидкість прямолінійного рівномірного руху дорівнює відношенню переміщення тіла до проміжку часу, за який відбулося це переміщення:

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

З цієї формули випливає, що

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

Зручно направити вісь  $x$  уздовж прямої, по якій рухається тіло, тоді  $v_x = \frac{s_x}{t}$ .



Проекція швидкості  $v_x$  може бути як додатною (рис. 2.1, а), так і від'ємною (рис. 2.1, б) — залежно від того, у якому напрямі осі  $x$  рухається тіло.

Формули залежності від часу проекції переміщення  $s_x$  і координати  $x$  мають вигляд:

$$s_x = v_x t, \quad x = x_0 + v_x t.$$

Одиниця швидкості в SI — 1 м/с. Це швидкість неспішної прогулянки. Ідучи з такою швидкістю, людина проходить за одну годину 3600 м, тобто її швидкість дорівнює 3,6 км/год. Швидкість автомобілів і потягів задають зазвичай у кілометрах за годину.

Швидкість ракет і штучних супутників Землі задають у кілометрах за секунду (км/с).

Як ми побачимо в § 10. Закон всесвітнього тяжіння, швидкість руху штучного супутника Землі навколоземною орбітою становить близько 8 км/с.

## 2. ГРАФІКИ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ

Наочне уявлення про рух тіла дають графіки залежності від часу швидкості, переміщення, координати і шляху. Розглянемо, як будують ці графіки, на конкретному прикладі.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

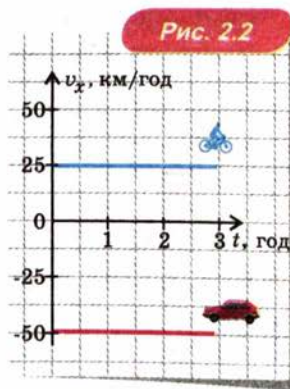
По прямій дорозі їдуть велосипедист і автомобіль. Велосипедист їде в одному напрямі зі швидкістю 25 км/год, автомобіль — у протилежному напрямі зі швидкістю 50 км/год. У початковий момент велосипедист перебував у точці з координатою  $x = 25$  км, автомобіль — у точці з координатою  $x = 100$  км. Побудуємо графіки залежності від часу проекції швидкості, переміщення, координати та шляху.

**Розв'язання.** Направимо вісь  $x$  у напрямі швидкості велосипедиста.

**Графіки залежності проекції швидкості від часу.** Оскільки тіла рухаються з постійною швидкістю, графік функції  $v_x(t)$  — пряма, паралельна осі  $t$ . Для велосипедиста  $v_x > 0$ , тому графік проходить вище осі  $t$ , а для автомобіля  $v_x < 0$ , тому графік проходить нижче осі  $t$ . Ці графіки наведено на рис. 2.2.

Графік залежності проекції швидкості від часу для прямолінійного рівномірного руху може здатися не надто цікавим. Однак він має важливу властивість, яка невдовзі нам допоможе. Для зручності розглянемо випадок, коли проекція швидкості є додатною. Тоді

площа фігури, обмеженої графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , чисельно дорівнює проекції переміщення.





Щоб переконатися в цьому, розглянемо фігуру, розташовану під графіком проєкції швидкості (її виділено кольором на рис. 2.3).

Ця фігура — прямокутник. Його площа дорівнює добутку висоти  $v_x$  на основу  $t$ , тобто дорівнює  $v_x t$ . А це чисельно дорівнює переміщенню за умови прямолінійного рівномірного руху.

**Графік залежності проєкції переміщення від часу.** З формули  $s_x(t) = v_x t$  випливає, що графіком  $s_x(t)$  є пряма, що проходить через початок координат (рис. 2.4). Якщо  $v_x > 0$ , то  $s_x$  збільшується з часом (саме так для велосипедиста), а якщо  $v_x < 0$ , то  $s_x$  зменшується з часом (саме так для автомобіля).

Зверніть увагу на те, що нахил графіка  $s_x(t)$  тим більший, чим більший модуль швидкості.

**Графік залежності координати від часу.** Графік  $x(t) = x_0 + s_x(t)$  відрізняється від графіка  $s_x(t)$  тільки зсувом на  $x_0$  по осі ординат (рис. 2.5). Точка перетину двох графіків відповідає моменту, коли координати тіл збігаються, отже, ця точка графіка визначає момент часу і координату зустрічі двох тіл.

По наведених графіках видно, що велосипедист і автомобіль протягом першої години рухалися назустріч один одному, а потім — віддалялися один від одного.

**Графік шляху.** Зверніть увагу: хоча велосипедист і автомобіль рухаються в протилежних напрямках, в обох випадках пройдений кожним з них шлях зростає з часом (рис. 2.6).

Рис. 2.3

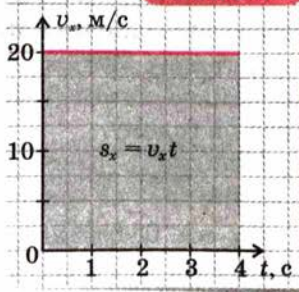


Рис. 2.4

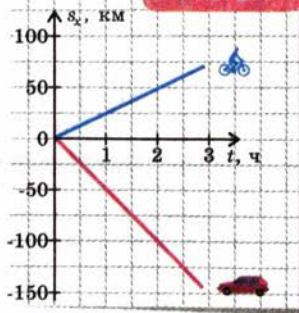


Рис. 2.5

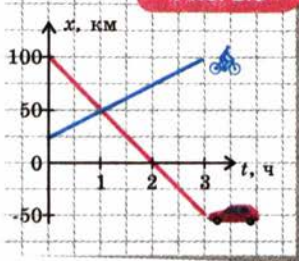
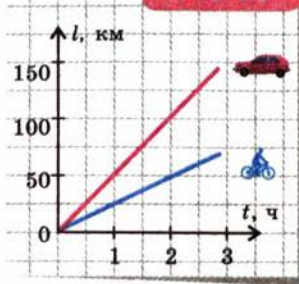


Рис. 2.6



### 3. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ

Прямолінійний рівномірний рух зустрічається досить рідко. Значно частіше ми спостерігаємо приклади нерівномірного руху.

*Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло проходить за рівні проміжки часу різні шляхи.*

Прикладами нерівномірного руху можуть служити падіння яблука з гілки дерева, розгін і гальмування автомобіля.

Для опису нерівномірного руху часто використовують середню швидкість.

*Середньою швидкістю* нерівномірного руху  $\bar{v}_c$  за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення  $\bar{s}$  до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:

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

Слова «за даний проміжок часу» вказують на те, що за умови нерівномірного руху середня швидкість тіла за різні проміжки часу може бути різною.

Наприклад, коли автомобіль розганяється, то його середня швидкість за першу секунду може дорівнювати  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а за другу секунду — вже  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . А для автобуса, що гальмує, навпаки, середня швидкість за кожну наступну секунду менша, ніж за попередню.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого воно за будь-які рівні проміжки часу здійснює рівні переміщення.
- Швидкість прямолінійного рівномірного руху дорівнює відношенню переміщення  $\bar{s}$  тіла до проміжку часу  $t$ , за який здійснено це переміщення:  $\bar{v} = \frac{\bar{s}}{t}$ . Швидкість — величина векторна.
- Формули залежності від часу переміщення, проекції переміщення та координати мають вигляд:  $\bar{s} = \bar{v}t$ ,  $s_x = v_x t$ ,  $x = x_0 + v_x t$ .
- Графіком залежності проекції переміщення від часу за умови прямолінійного рівномірного руху є відрізок прямої, один кінець якого збігається з початком координат. Чим більша швидкість тіла, тим більший кут між графіком залежності проекції переміщення від часу та віссю часу.
- Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло проходить за рівні проміжки часу різні шляхи.

- Середньою швидкістю нерівномірного руху за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:  $\bar{v} = \frac{\bar{s}}{t}$ .

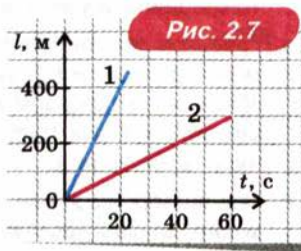
## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

- Наведіть приклади прямолінійного рівномірного руху.
- Автомобіль рухається рівномірно по прямому шосе. З якою швидкістю їде автомобіль, якщо кожної хвилини він проїжджає повз кілометровий стовп?
- Хороший спортсмен пробігає стометрівку за 10 с. Яка його швидкість у метрах за секунду та в кілометрах за годину?
- Автомобіль їде зі швидкістю  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Яка його швидкість у кілометрах за годину?
- Побудуйте на одному рисунку графіки залежності шляху від часу для двох автомобілів — синього і червоного. Синій рухається зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а червоний — зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Для якого автомобіля кут між графіком та віссю часу більший?
- Що таке нерівномірний рух? Наведіть декілька прикладів такого руху.
- Що таке середня швидкість? Як пов'язаний модуль середньої швидкості зі шляхом під час прямолінійного руху в одному напрямі?
- Автомобіль за 1 год проїхав 60 км, потім 1 год стояв, а потім ще за 1 год проїхав 90 км. Автомобіль весь час рухався прямолінійним шосе в одному напрямі. Яка середня швидкість автомобіля?

### Другий рівень

- Який вигляд має графік залежності шляху від часу за умови прямолінійного рівномірного руху? Намалюйте такі графіки для двох автомобілів, якщо швидкість першого автомобіля удвічі більша за швидкість другого.
- На рис. 2.7 наведено графіки залежності шляху від часу для двох тіл, що рухаються прямолінійно. Знайдіть швидкість руху кожного з цих тіл. У скільки разів швидкість першого тіла більша за швидкість другого?
- Який вигляд має графік залежності модуля швидкості від часу за умови прямолінійного рівномірного руху? Як можна знайти пройдений шлях за допомогою графіка швидкості?





12. Залежність координати тіла від часу в одиницях SI має вигляд  $x = -15 + 2,5t$ . З якою швидкістю рухається тіло та в якому напрямі відносно вісі  $x$ ? Через який час координата тіла дорівнюватиме 15 м?
13. Пасажир проїхав половину часу на автомобілі зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а половину часу — потягом зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Чому дорівнює його середня швидкість за весь час руху? Автомобіль та поїзд весь час рухалися по прямій в одному напрямі.
14. Пасажир проїхав першу половину шляху на автомобілі зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а другу половину шляху — потягом зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Чому дорівнює його середня швидкість за весь час руху? Автомобіль весь час рухався прямолінійним шосе в одному напрямі. Чому відповідь цієї задачі відрізняється від відповіді попередньої?
15. Складіть задачу за темою «Прямолінійний рівномірний рух», відповіддю якої було б «Не наздожене».

## § 3. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ

1. Миттєва швидкість
2. Прискорення
3. Прямолінійний рівноприскорений рух
4. Вільне падіння

### 1. МИТТЄВА ШВИДКІСТЬ

Якщо швидкість тіла змінюється з часом, для опису руху треба знати, чому дорівнює швидкість тіла в *даній момент часу* (або в даній точці траєкторії). Цю швидкість називають *миттєвою швидкістю*.

Наочне уявлення про миттєву швидкість дає прилад для вимірювання швидкості автомобіля — *спідометр* (рис. 3.1).

Можна сказати, що *миттєва швидкість* — це *середня швидкість за дуже малий проміжок часу*. Під час руху зі змінною швидкістю середня швидкість, вимірювана за різні проміжки часу, буде різною. Проте якщо при вимірюванні середньої швидкості брати щораз менші проміжки часу, значення середньої швидкості наблизиться до деякого певного значення. Це і є миттєва швидкість у даний момент часу. Надалі, говорячи про швидкість тіла, ми матимемо на увазі його *миттєву швидкість*.



Рис. 3.1

Поняття миттєвої швидкості добре ілюструє такий приклад зі знаменитих «Фейнманівських лекцій з фізики» (рис. 3.2).

Поліцейський зупиняє машину, і між ним та жінкою за кермом відбувається така розмова.

— Ви порушили правила дорожнього руху: їхали зі швидкістю 90 кілометрів за годину.

— Я всього 7 хвилин тому виїхала з дому, як же я могла проїхати 90 кілометрів за годину?

— Але якби ви продовжували так їхати, то ви проїхали б за годину 90 кілометрів.



— А я й не збиралася так їхати аж годину! Я збиралася проїхати ще один квартал і зупинитися.

Як би ви на місці поліцейського довели, що правила дорожнього руху все-таки було порушено?

## 2. ПРИСКОРЕННЯ

Якщо швидкість тіла під час руху змінюється, виникає питання: якою є «швидкість зміни швидкості»? Ця величина, яку називають *прискоренням*, відіграє дуже важливу роль у всій механіці: незабаром ми побачимо, що прискорення тіла визначається діючими на це тіло силами.

Нехай швидкість тіла в момент часу  $t_1$  дорівнювала  $\vec{v}_1$ , а в момент часу  $t_2$  стала рівною  $\vec{v}_2$ . Позначимо *зміну* швидкості  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ , а проміжок часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

*Прискоренням* називають<sup>1</sup> відношення зміни швидкості тіла до проміжку часу, за який ця зміна відбулася:

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

Як впливає з визначення, прискорення — величина *векторна*. Напрямок прискорення збігається з напрямком вектора *зміни швидкості*  $\Delta\vec{v}$ .

### Приклади:

1. Коли автомобіль розганяється, його прискорення напрямлене в той же бік, що і швидкість.
2. Коли автомобіль гальмує, його прискорення напрямлене протилежно швидкості.

<sup>1</sup> Це визначення середнього прискорення за час  $\Delta t$ . Миттєвим прискоренням називають середнє прискорення за дуже малий проміжок часу.



Одиниця прискорення в SI:  $1 \text{ м/с}^2$ . Якщо тіло рухається в певному напрямі з прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ , його швидкість змінюється щосекунди на  $1 \text{ м/с}$ .

Термін «прискорення» використовують у фізиці, коли мова йде про *будь-яку* зміну швидкості, у тому числі й тоді, коли модуль швидкості зменшується або коли модуль швидкості залишається незмінним і швидкість змінюється тільки за напрямом.

### 3. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ

*Прямолінійним рівноприскореним<sup>1</sup> рухом* називають прямолінійний рух тіла з постійним прискоренням.

Прикладами такого руху є падіння тіл зі стану спокою, якщо можна знехтувати опором повітря, а також рух тіла вздовж похилої площини.

#### ШВИДКІСТЬ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

З визначення прискорення  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  випливає:  $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$ .

Отже,

під час прямолінійного рівноприскореного руху швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на ту ж саму величину.

Позначимо  $\vec{v}_0$  швидкість тіла в початковий момент (при  $t = 0$ ), а  $\vec{v}$  — швидкість тіла в момент часу  $t$ . Тоді  $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ , а  $\Delta t = t$ , тому формула  $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$  набуде вигляду  $\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}t$ . Звідси випливає:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

Якщо направити вісь  $x$  уздовж прямої, по якій рухається тіло, то в проекціях на вісь  $x$  отримаємо:

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

Таким чином, за умови прямолінійного рівноприскореного руху проекція швидкості *лінійно* залежить від часу. Це означає, що *графіком залежності  $v_x(t)$  є відрізок прямої*.

На рис. 3.3 наведено графік швидкості автомобіля, що розганяється, а на рис. 3.4 — автомобіля, що гальмує. Для першого

<sup>1</sup> Прямолінійний рівноприскорений рух називають іноді рівнозмінним. Рух з прискоренням, яке дорівнює нулю, ми будемо розглядати як рівномірний прямолінійний рух.

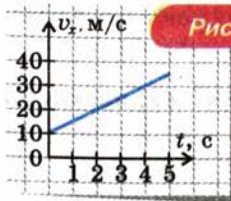


Рис. 3.3

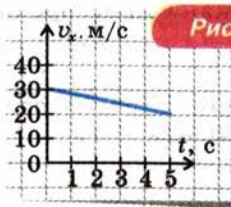


Рис. 3.4

автомобіля  $v_{0x} = 10 \text{ м/с}$ ,  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $a_x > 0$ . Для другого

автомобіля  $v_{0x} = 30 \text{ м/с}$ ,  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = -2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $a_x < 0$ .

### ПЕРЕМІЩЕННЯ ТІЛА ПІД ЧАС ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

Нагадаємо спочатку, що за умови *рівномірного* руху проекція переміщення  $s_x$  чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ .

Це справедливо і для *нерівномірного* руху. Приклад графіка залежності проекції швидкості від часу для такого руху наведено на рис. 3.5, а. Увесь час руху можна розбити на такі малі проміжки часу, що протягом кожного з них рух тіла можна вважати практично рівномірним. Схематично це показано на рис. 3.5, б.

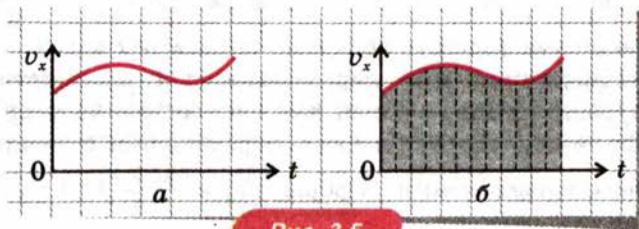


Рис. 3.5

Скористаємося цим, щоб знайти, як залежить переміщення від часу за умови *прямолінійного рівноприскореного* руху.

Якщо початкова швидкість тіла дорівнює нулю, фігура, обмежена графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , — трикутник площею  $a_x t^2 / 2$  (рис. 3.6).

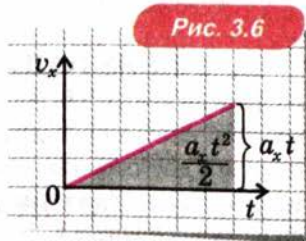


Рис. 3.6

Користуючись формулою для площі прямокутного трикутника, отримуємо, що

при прямолінійному рівноприскореному русі без початкової швидкості

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Якщо ж початкова швидкість тіла не дорівнює нулю, то фігура, обмежена графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , є *трапецією*, що складається з *прямокутника* площею  $v_{0x}t$  і *трикутника* площею  $a_x t^2/2$  (рис. 3.7).

Отже,

за умови прямолінійного рівноприскореного руху з початковою швидкістю  $v_0$

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

**Залежність координати від часу.**

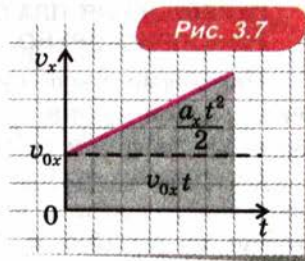
Оскільки  $x = x_0 + s_x$ , отримуємо

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

**Середня швидкість під час прямолінійного рівноприскореного руху.** Користуючись виведеними вище формулами, легко довести, що  $v_{cx} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}$ . Це співвідношення спрощує розв'язання багатьох задач.

**Співвідношення між переміщенням і швидкістю.** Для розв'язування задач, в умові яких не задано часу руху, корисні формули, що пов'язують переміщення з початковою і кінцевою швидкостями. З формул  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t$  і  $t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}$

отримуємо:  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ . Якщо початкова швидкість дорівнює нулю, ця формула набуває вигляду  $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$ .



#### 4. ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ

Наприкінці 16-го століття італійський учений Галілей зробив важливе відкриття: вивчаючи падіння тіл, він виявив на досліді, що коли опором повітря можна знехтувати, то всі тіла, падаючи, рухаються *рівноприскорено з однаковим прискоренням*.



Падіння тіла за умов, коли опором повітря можна знехтувати, називають *вільним падінням*.

Відкриття Галілея було згодом підтверджено в багатьох дослідах. У цих дослідах було також виміряно прискорення тіл під час вільного падіння. Поблизу поверхні Землі воно виявилось рівним приблизно  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Це прискорення називають *прискоренням вільного падіння* і позначають  $\vec{g}$ . У різних точках земної поверхні значення  $g$  трохи відрізняються (у межах 0,5 %). Для приблизних обчислень часто приймають  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**Залежність швидкості і координати падаючого тіла від часу.** Якщо тіло вільно падає без початкової швидкості, то  $\vec{v} = \vec{g}t$ .

Зручно сумістити початок координат із початковим положенням тіла і направити вісь  $y$  *униз*: тоді проекції прискорення, швидкості і переміщення будуть додатними. З формули  $\vec{v} = \vec{g}t$  випливає:  $v_y = gt$ . Під час вільного падіння швидкість тіла збільшується щосекунди приблизно на  $10 \text{ м/с}$ .

Оскільки  $y_0 = 0$ , одержуємо  $y = \frac{gt^2}{2}$ .

**Рух тіла з початковою швидкістю.** З прискоренням вільного падіння  $\vec{g}$  рухаються також тіла, кинуті з деякою початковою швидкістю<sup>1</sup>.

Отже, залежність від часу швидкості  $\vec{v}$  тіла, кинутого з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ , виражається формулою

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t.$$

Розглянемо випадок, коли тіло кинуте вгору. Сумістимо початок координат з початковим положенням тіла і направимо вісь  $y$  вертикально вгору. Тоді проекції швидкості і переміщення під час руху вгору будуть додатними.

З формули  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$  випливає:

$$v_y = v_0 - gt.$$

Оскільки  $y_0 = 0$ , одержуємо  $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$ .

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Миттєвою швидкістю називають швидкість тіла в даний момент часу (або в даній точці траєкторії).

<sup>1</sup> Припускається, що опором повітря можна знехтувати. Рух тіл за таких умов також називають іноді вільним падінням.

- Прискоренням тіла  $\vec{a}$  називають відношення зміни швидкості тіла до проміжку часу, за який ця зміна відбулася:  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ .
- Прямолінійним рівноприскореним рухом називають рух тіла вздовж прямої з постійним прискоренням. За умови прямолінійного рівноприскореного руху швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на ту ж саму величину.
- За умови прямолінійного рівноприскореного руху:
 

Швидкість  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ .

Проекція швидкості  $v_x = v_{0x} + a_x t$ .

Проекція переміщення під час руху без початкової швидкості  $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$ .

Проекція переміщення під час руху з початковою швидкістю  $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

Залежність координати від часу під час руху з початковою швидкістю  $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

Середня швидкість  $v_{cx} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}$ .

Співвідношення між переміщенням і швидкістю: а) без початкової швидкості:  $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$ ; б) із початковою швидкістю:  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ .
- Вільним падінням називають падіння тіла за умови, що опором повітря можна знехтувати.
- Під час вільного падіння поблизу поверхні Землі всі тіла рухаються з однаковим прискоренням, яке називають прискоренням вільного падіння і позначають  $\vec{g}$ . З досліду випливає, що  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .
- Залежність швидкості від часу за умови руху вільного падіння:  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ .



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Що таке миттєва швидкість? За допомогою якого приладу вимірюють миттєву швидкість автомобіля?
2. Який рух називають прямолінійним рівноприскореним? Наведіть приклад такого руху.
3. Що таке прискорення?

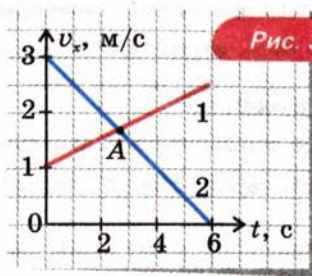
4. Як залежить модуль швидкості від часу за умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості? з початковою швидкістю?
5. Чому дорівнює прискорення вільного падіння?
6. Як напрямлене прискорення тіла, кинутого вертикально вгору, під час піднімання?
7. Тіло кидають вертикально вгору зі швидкістю  $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . За який час тіло підніметься до найвищої точки?
8. Автомобіль рухається прямолінійно рівноприскорено в одному напрямі. За 6 с швидкість автомобіля збільшилася на  $12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . З яким прискоренням він рухається?
9. Автомобіль, що їде зі швидкістю 10 м/с, почав розганятися. Якою стане його швидкість через 5 с, якщо прискорення автомобіля  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?
10. Чому дорівнює швидкість тіла, що вільно падає, через 1 с після початку падіння? через 3 с?
11. Побудуйте графік залежності проекції швидкості від часу для гальмуючого автомобіля, який рухається прямолінійно рівноприскорено, якщо початкова швидкість дорівнює  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а прискорення  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

### Другий рівень

12. Автомобіль рухається прямолінійно рівноприскорено. За 5 с його швидкість зменшилася вдвічі й тепер дорівнює  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . З яким прискоренням рухається автомобіль? Через який час він зупиниться, якщо рухатиметься з тим самим прискоренням?
13. Через який час після початку падіння швидкість тіла, що вільно падає, дорівнюватиме швидкості автомобіля, що їде зі швидкістю  $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ ?
14. Автомобіль їде прямолінійно рівноприскорено на північ. Як напрямлене прискорення автомобіля, якщо його швидкість збільшується? зменшується?
15. Як напрямлене прискорення тіла, кинутого вертикально вгору, у верхній точці траєкторії?
16. М'яч кинули вертикально вгору зі швидкістю  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через який час м'яч досягне найвищої точки?
17. Два тіла падають з однієї точки без початкової швидкості. Друге тіло почало рухатися через 1 с після першого. Як ці тіла рухаються одне відносно одного?



18. Побудуйте графік залежності проекції швидкості автомобіля від часу, якщо він рухається з прискоренням  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Початкова швидкість автомобіля дорівнює  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Автомобіль рухається прямолінійно. Напрямок прискорення збігається з напрямом початкової швидкості.
19. За графіками  $v_x(t)$  (див. рис. 3.8) опишіть рухи двох тіл. Чи відповідає точка  $A$  на рисунку моменту зустрічі тіл? Запишіть залежність  $v_x(t)$  для кожного з тіл.



20. Прямолінійний рух тіла задано в одиницях SI формулою  $x = -4 + 2t - t^2$ . Опишіть рух тіла та побудуйте для нього графіки  $v_x(t)$ ,  $s_x(t)$ ,  $l(t)$ .
21. Складіть задачу за темою «Прямолінійний рівноприскорений рух», відповіддю якої було б  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

## § 4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

1. Рівняння руху
2. Робота з графіками
3. Шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні проміжки часу
4. Задачі, в умові яких не дано часу руху
5. Середня швидкість під час прямолінійного рівноприскореного руху

### 1. РІВНЯННЯ РУХУ

Нагадаємо, що за умови прямолінійного рівноприскореного руху вздовж осі  $x$  залежність координати  $x$  від часу виражається формулою  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

#### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Рівняння руху тіл, що рухаються вздовж осі  $x$ , мають вигляд (усі величини задано в одиницях SI):

а)  $x = 5 + 3t - 6t^2$ ;

б)  $x = 4 + 3t$ ;

в)  $x = -2 - 4t + 3t^2$ ;

г)  $x = 3 - 7t - 2t^2$ .

Які з цих тіл рухаються рівноприскорено? Чому дорівнюють при цьому проекція початкової швидкості  $v_{0x}$  і проекція прискорення  $a_x$ ? У яких випадках на початку руху тіло рухається в додатному напрямі осі  $x$ ? У яких випадках швидкість тіла на початку руху збільшується за модулем?

**Розв'язання.** За умови рівноприскореного руху згідно з формулою залежності координати від часу рух є рівноприскореним тільки у випадках а, в і г. Порівнюючи формули а, в і г із рівнянням  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ , одержуємо для цих випадків:

а)  $v_{0x} = 3 \text{ м/с}$ ,  $a_x = -12 \text{ м/с}^2$ ;

в)  $v_{0x} = -4 \text{ м/с}$ ,  $a_x = 6 \text{ м/с}^2$ ;

г)  $v_{0x} = -7 \text{ м/с}$ ,  $a_x = -4 \text{ м/с}^2$ .

Напрямок руху визначається знаком проекції швидкості: якщо вона додатна, тіло рухається в додатному напрямі осі  $x$ .

На початку руху напрям руху визначається знаком проекції початкової швидкості. Ця проекція додатна у випадках а і б.

Швидкість тіла під час рівноприскореного руху збільшується за модулем, якщо проекція прискорення має той самий знак, що і проекція швидкості, і зменшується, якщо ці проекції мають протилежні знаки. Таким чином, на початку руху швидкість збільшується за модулем тільки у випадку г. При цьому тіло рухається у від'ємному напрямі осі  $x$ . У випадках же а і в швидкість тіла на початку руху зменшується за модулем.

## 2. РОБОТА З ГРАФІКАМИ

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

На рис. 4.1 наведено графік  $v_x(t)$  для тіла, що рухається вздовж осі  $x$ . Побудуйте графіки  $a_x(t)$ ,  $s_x(t)$ ,  $x(t)$  і  $l(t)$ , вважаючи, що початкова координата тіла  $x_0 = 2$  м.

**Розв'язання.** Тіло рухається рівноприскорено, оскільки графік  $v_x(t)$  — відрізок прямої. Отже,  $v_x(t) = v_{0x} + a_x t$ . Проекція початкової швидкості  $v_{0x} = v_x(0) = 4$  м/с.

У момент  $t = 2$  с проекція швидкості дорівнює нулю:  $v_x(2) = 4 + a_x \cdot 2 = 0$ . Звідси  $a_x = -2$  м/с<sup>2</sup>.

Оскільки прискорення є постійним, графіком  $a_x(t)$  є відрізок прямої, паралельної осі  $t$  (рис. 4.2).

Проекція переміщення під час рівноприскореного руху описується формулою

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

Підставляючи у цю формулу знайдені значення  $v_{0x} = 4$  м/с і  $a_x = -2$  м/с<sup>2</sup>, одержуємо

$$s_x(t) = 4 \cdot t + \frac{(-2) \cdot t^2}{2} = 4t - t^2.$$

Отже, графіком  $s_x(t)$  є парабола, що проходить через початок координат (рис. 4.3). Вершина цієї параболи знаходиться при  $t = 2$  с ( $s_x = 4$  м).

Графік  $x(t)$  відрізняється від графіка  $s_x(t)$  тільки зсувом на  $x_0 = 2$  м по осі ординат (рис. 4.4).

Рис. 4.1

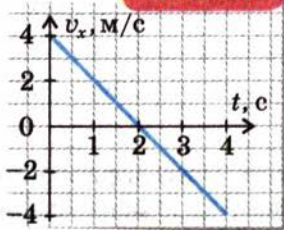


Рис. 4.2

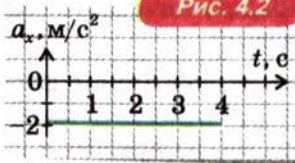
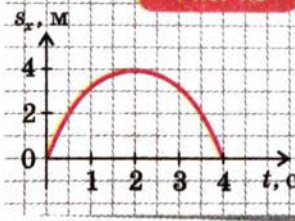
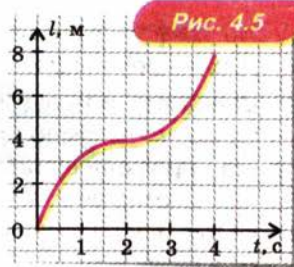
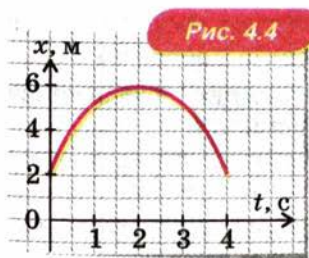


Рис. 4.3







При побудові графіка залежності шляху від часу  $l(t)$  врахуємо, що *шлях не може убавати з часом* (рис. 4.5).

### 3. ШЛЯХИ, ЯКІ ПРОХОДИТЬ ТІЛО ЗА ПОСЛІДОВНІ РІВНІ ПРОМІЖКИ ЧАСУ

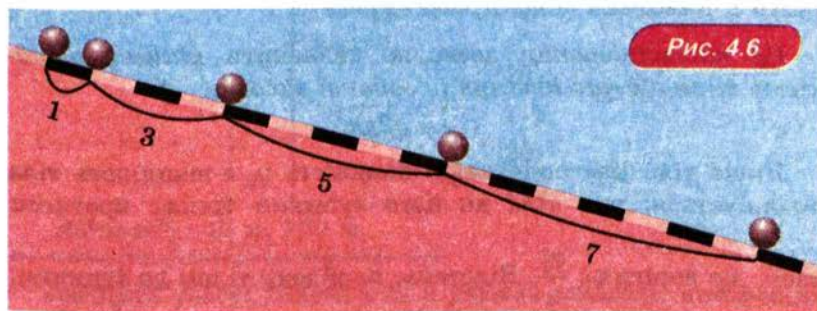
Основні властивості прямолінійного рівноприскореного руху визначив Галілей. Наприклад, він установив таку чудову властивість:

за умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні проміжки часу, відносяться як послідовні непарні числа (1:3:5:7...).

Цю властивість прямолінійного рівноприскореного руху схематично проілюстровано на рисунку 4.6.

Доведемо її для трьох перших послідовних проміжків часу (якщо бажаєте, продовжіть доведення самостійно).

Скористаємося тим, що шлях чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності модуля швидкості від часу. На рисунку 4.7, а шляхи, пройдені за кожний із трьох перших послідовних рівних проміжків часу (для визначеності ми взяли по 1 с кожний), чисельно дорівнюють площам жов-



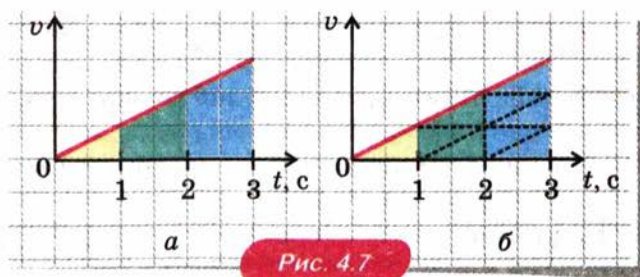


Рис. 4.7

тої, зеленої та синьої фігур. Розіб'ємо всі фігури, крім першої, на трикутники, площа кожного з яких дорівнює площі першої фігури (рис. 4.7, б). Ця розбивка наочно показує, що шляхи, які проходить тіло за три перші послідовні рівні проміжки часу, відносяться як 1:3:5.

#### 4. ЗАДАЧІ, В УМОВІ ЯКИХ НЕ ДАНО ЧАСУ РУХУ

У деяких задачах потрібно знайти пройдений тілом шлях за умови, що час руху невідомий, але відомі прискорення та початкова чи кінцева швидкість тіла.

Якщо початкова швидкість дорівнює нулю, час руху можна виразити через модуль кінцевої швидкості та прискорення:

$$t = \frac{v}{a}.$$

Підставляючи цей вираз у формулу для шляху  $l = \frac{at^2}{2}$ , отримаємо

$$l = \frac{v^2}{2a}.$$

З цієї формули випливає, зокрема, що за умови вільного падіння висота  $h$ , з якої падає тіло, та його кінцева швидкість пов'язані співвідношенням

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Це співвідношення дозволяє визначити кінцеву швидкість тіла під час падіння із заданої висоти:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Якщо тіло має початкову швидкість  $v_0$  і швидкість тіла зменшується, рух тіла до його зупинки триває протягом

часу, що дорівнює  $\frac{v_0}{a}$ . Відстань, пройдену тілом до зупинки,

знаходимо з формули  $l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ , підставивши в неї замість  $t$  час руху тіла до зупинки, тобто  $\frac{v_0}{a}$ . Ми отримаємо, що до повної зупинки тіло пройде шлях  $l = \frac{v_0^2}{2a}$ .

Зверніть увагу: цей шлях (для засобів транспорту його називають *гальмівним шляхом*) пропорційний *квадрату* початкової швидкості!

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Під час гальмування на сухому асфальті автомобіль рухається з прискоренням, що дорівнює за модулем  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чому дорівнює гальмівний шлях автомобіля, якщо він їде зі швидкістю  $72 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ ? Яким буде його гальмівний шлях у разі ожеледі, коли модуль прискорення  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?

**Дано:**

$$v_0 = 72 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$a_1 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$a_2 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$l_1 = ?$$

$$l_2 = ?$$

**Розв'язання**

Під час руху до зупинки автомобіль пройде шлях  $l = \frac{v_0^2}{2a}$ .

Перевіримо одиниці величин:

$$[l] = \frac{\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення й отримаємо

$$l_1 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 5} = 40 \text{ (м)};$$

$$l_2 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 2} = 100 \text{ (м)}.$$

**Відповідь:** 40 м; 100 м.

Зверніть увагу: гальмуючи в умовах ожеледі, автомобіль проїжджає відстань у 2,5 рази більшу, ніж під час гальмування на сухому асфальті!



## 5. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ПІД ЧАС ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

Доведемо, що

під час прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості середня швидкість тіла дорівнює половині кінцевої швидкості.

Під час прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості шлях  $l = \frac{at^2}{2}$ , а кінцева швидкість  $v = at$ . Тому вираз для шляху можна записати у вигляді  $l = \frac{vt}{2}$ . Згадаймо тепер, що за умови прямолінійного руху в одному напрямі модуль середньої швидкості  $v_c = \frac{l}{t}$ . Порівнюючи дві останні формули, отримуємо

$$v_c = \frac{v}{2}.$$

Доведення закінчено.

Пропонуємо вам самим довести, що

під час прямолінійного рівноприскореного руху, коли кінцева швидкість дорівнює нулю, середня швидкість тіла дорівнює половині його початкової швидкості.

Ці властивості середньої швидкості прямолінійного рівноприскореного руху дозволяють значно спростити розв'язання деяких задач. Розглянемо приклад.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Автомобіль почав гальмувати, коли його швидкість дорівнювала  $72 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Скільки часу тривало гальмування до зупинки, якщо гальмівний шлях 200 м?

Дано:

$$v = 72 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$l = 200 \text{ м}$$

$$t = ?$$

Розв'язання

$$\text{Середня швидкість } v_c = \frac{v}{2};$$

$$t = \frac{l}{v_c} = \frac{l}{\frac{v}{2}} = \frac{2l}{v}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[t] = \frac{\frac{m}{m}}{c} = c.$$

Підставимо числові значення й отримаємо

$$t = \frac{2 \cdot 200}{20} = 20 \text{ (с)}.$$

**Відповідь:** 20 с.



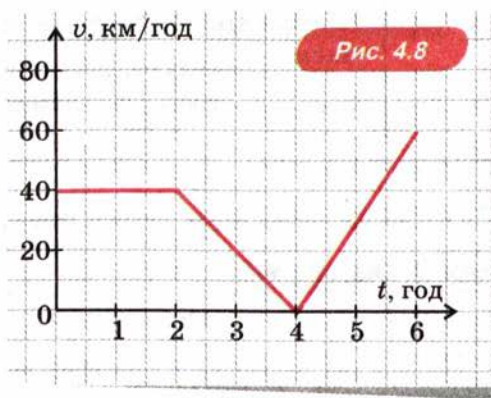
## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Напишіть рівняння залежності шляху, пройденого тілом, від часу, якщо тіло рухається зі стану спокою рівноприскорено з прискоренням  $4 \frac{m}{c^2}$ ?
2. Тіло рухалося прямолінійно рівноприскорено без початкової швидкості. Прискорення тіла  $5 \frac{m}{c^2}$ . Який шлях тіло пройшло за 1 с? за 2 с? за другу секунду?
3. Рухаючись прямолінійно рівноприскорено без початкової швидкості, тіло пройшло за першу секунду 3 м. Який шлях пройде це тіло за 2 с? за 3 с?
4. З якої висоти вільно падало тіло, якщо падіння тривало 2 с?
5. Яка кінцева швидкість тіла під час падіння з висоти 20 м?
6. Автомобіль рушив з місця і рухався з прискоренням  $3 \frac{m}{c^2}$ . Чому дорівнює швидкість автомобіля через 2 с? Який шлях пройде автомобіль за вказаний час?
7. Чому дорівнює гальмівний шлях автомобіля, якщо його початкова швидкість  $30 \frac{m}{c}$ , а модуль прискорення під час гальмування  $3 \frac{m}{c^2}$ ?
8. Автомобіль рухався зі швидкістю  $10 \frac{m}{c}$ . У деякий момент він почав розганятися з прискоренням  $2 \frac{m}{c^2}$ . Який шлях він проїхав за 3 с розгону?

## Другий рівень

9. На рис. 4.8 зображено графік залежності модуля швидкості від часу для автомобіля, що їхав в одному напрямі. Чому дорівнює шлях, пройдений за 2 год? за 4 год? за 6 год?



10. Два тіла почали рух одночасно. Перше тіло рухається прямолінійно рівномірно, а друге — прямолінійно рівноприскорено. За першу секунду руху обидва тіла пройшли однаковий шлях. Яке тіло пройде більший шлях за 2 секунди? У скільки разів більший?
11. Два тіла рухаються прямолінійно, причому залежність координати від часу для них описується формулами:  $x_1 = 16 - 18t + 3t^2$ ,  $x_2 = -20 + 15t - 2,5t^2$ . Опишіть рух кожного з тіл, побудуйте для них графіки  $v_x(t)$ .
12. Тіло кинуте вертикально вгору зі швидкістю  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . На яку висоту воно підніметься?
13. Кулька скочується похилою площиною завдовжки 90 см за 3 с. Яку відстань проходить кулька за кожну секунду?
14. Доведіть, що під час прямолінійного рівноприскореного руху в одному напрямі середня швидкість тіла дорівнює півсумі початкової та кінцевої швидкостей.
15. Санчата скотилися схилом гори завдовжки 48 м за 16 с. Яка швидкість санчат у кінці спуску? Рух санчат можна вважати рівноприскореним з початковою швидкістю, що дорівнює нулю.
16. Автомобіль рухається рівноприскорено. Початкова швидкість  $40 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а кінцева швидкість  $80 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Автомобіль проїхав при цьому 1 км. Скільки часу він їхав по цій ділянці?



17. Автомобіль гальмував протягом 5 с. При цьому швидкість автомобіля зменшилася з 30 до  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Який шлях проїхав автомобіль за час гальмування?
18. Виведіть формулу  $l = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$ , де позначення фізичних величин відповідають позначенням у тексті параграфа.
19. Куля, яка вилетіла з рушниці, пробила піщаний вал. При цьому швидкість кулі зменшилася з 500 до  $300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Рух кулі всередині валу можна вважати рівноприскореним. З яким прискоренням рухалася куля всередині валу, якщо його товщина 1 м? Скільки часу рухалася куля всередині валу?
20. Поїзд почав гальмувати при швидкості 72 км/год. Яка його швидкість після проходження половини гальмівного шляху?
21. Складіть задачу за темою «Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху», відповіддю якої було б «125 м».

## § 5. РІВНОМІРНИЙ РУХ ПО КОЛУ

1. Модуль та напрям швидкості за умови рівномірного руху по колу
2. Кутова швидкість
3. Період обертання та обертова частота
4. Прискорення за умови рівномірного руху по колу

### 1. МОДУЛЬ ТА НАПРЯМ ШВИДКОСТІ ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО РУХУ ПО КОЛУ

Рух Місяця навколо Землі та планет навколо Сонця приблизно можна вважати *рівномірним рухом по колу*.

Рівномірний рух по колу часто відбувається в техніці, наприклад, так рухаються частини обертових механізмів.

Нагадаємо, що за умови рівномірного руху тіло проходить рівні шляхи за будь-які рівні проміжки часу. При цьому миттєва швидкість тіла залишається постійною *за модулем*. Далі ми, як зазвичай, називатимемо миттєву швидкість просто швидкістю.

Отже,

за умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається постійним.

А що ж змінюється? Змінюється *напрямок швидкості*. Покажемо, що

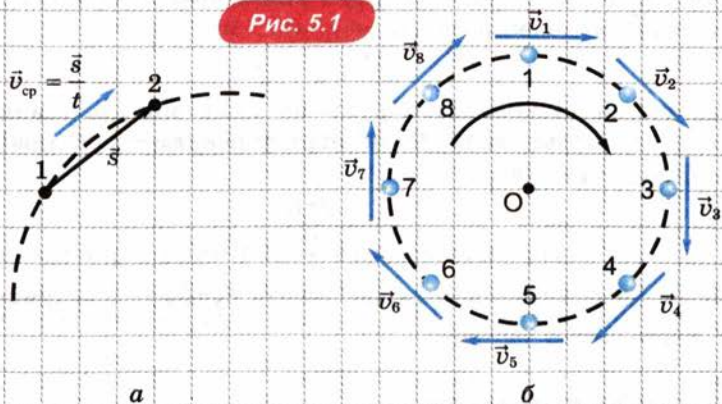
під час руху по колу швидкість у будь-якій точці траєкторії напрямлена *по дотичній* до кола в цій точці.

Нагадаємо, що *миттєва* швидкість у даний момент — це середня швидкість тіла за дуже малий проміжок часу, що включає даний момент.

З формули  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$  випливає, що середня швидкість за цей проміжок часу напрямлена так само, як переміщення  $\vec{s}$ .

Нехай за малий проміжок часу  $t$  тіло, що рухається по колу, перемістилося з точки 1 у точку 2 (рис. 5.1, а). Коли проміжок часу  $t$  зменшується, точки 1 і 2 зближуються. При цьому напрям переміщення  $\vec{s}$ , а разом з ним і напрям швидкості наближаються до напрямку *дотичної* до кола в цій точці. Доведення закінчено.

Рис. 5.1



Пригадайте, до речі, що саме по дотичній летять іскри під час заточування інструмента на точильному камені, що обертається.

На рисунку 5.1, б зображено швидкість тіла в різних точках траєкторії за умови рівномірного руху по колу. Зверніть увагу, що на рисунках вектор швидкості тіла розташовують поряд з тілом.

## 2. КУТОВА ШВИДКІСТЬ

Якщо матеріальна точка рівномірно рухається по колу, то радіус, проведений до цієї точки, за певний час робить поворот на певний кут — *кут повороту*.

Відношення кута повороту при рівномірному русі матеріальної точки по колу до проміжку часу, за який цей поворот був здійснений, називають *кутовою швидкістю* і позначають  $\omega$ .

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

Одиницею кутової швидкості є  $1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

## 3. ПЕРІОД ОБЕРТАННЯ ТА ОБЕРТОВА ЧАСТОТА

Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають *періодом обертання* і позначають  $T$ .

Визначимо, чому дорівнює період обертання  $T$ , якщо тіло рухається по колу радіусом  $R$  зі швидкістю  $v$ .



За час одного повного оберту  $T$  тіло проходить шлях  $l = 2\pi R$ , що дорівнює довжині кола.

Тому

за умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Це співвідношення дозволяє знайти будь-яку з величин  $v$ ,  $R$  і  $T$ , якщо відомі дві інші.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

**Яка швидкість руху Землі на її орбіті навколо Сонця? Виразіть цю швидкість у кілометрах за секунду. Відстань від Землі до Сонця можна прийняти рівною 150 млн км.**

**Розв'язання.** Період  $T$  обертання Землі під час її руху навколо Сонця дорівнює 1 року. Виражаючи період у секундах, отримаємо  $T = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$ . Отже,

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ с}} = 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

**Відповідь:**  $30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

Число повних обертів за 1 с називають *обертовою частотою* і позначають  $n$ .

Одиницею обертової частоти є  $\frac{1}{\text{с}}$ . Вона не завжди виражається цілим числом. Наприклад, якщо тіло робить повний оберт за 2 с, то  $n = 0,5 \frac{1}{\text{с}}$ .

Доведемо, що

*період і обертова частота є взаємооберненими величинами:*

$$T = \frac{1}{n}, \text{ а } n = \frac{1}{T}.$$

Припустимо, що тіло зробило  $N$  повних обертів за час  $t$ . Тоді період обертання

$$T = \frac{t}{N},$$

а число обертів за секунду, тобто обертова частота

$$n = \frac{N}{t}.$$

Отримані вирази для  $T$  і  $n$  є взаємооберненими.

З визначення кутової швидкості, періоду обертання та кутової швидкості випливає, що вони пов'язані співвідношеннями:

$$\omega = 2\pi n; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

#### 4. ПРИСКОРЕННЯ ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО РУХУ ПО КОЛУ

Як ми бачили, за умови рівномірного руху по колу *напрям* швидкості весь час змінюється. А будь-яка зміна швидкості тіла — у тому числі й тільки за напрямом — означає, що тіло *рухається з прискоренням*.

Можна показати, що

за умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра<sup>1</sup> кола.

Наприклад, під час руху по орбітах навколо Сонця Земля та інші планети рухаються з прискоренням, напрямленим до Сонця (рис. 5.2). І. Ньютон першим здогадався, що причиною цього прискорення є притягання всіх планет Сонцем. Ми розповімо про це в § 10. Закон всесвітнього тяжіння.

Можна довести, що

за умови рівномірного руху по колу модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.

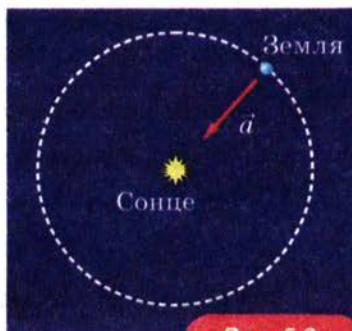


Рис. 5.2

<sup>1</sup> Тому це прискорення називають *доцентровим*.

Цю формулу ми використовуємо для розрахунку швидкості, якої треба надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі (див. § 10. Закон всесвітнього тяжіння).

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- За умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається постійним, а напрям швидкості змінюється: у будь-якій точці траєкторії швидкість напрямлена по дотичній до кола в цій точці.
- Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають періодом обертання і позначають  $T$ .
- Число повних обертів за 1 с називають обертовою частотою і позначають  $n$ .
- Період і обертова частота є взаємооберненими величинами:  
$$T = \frac{1}{n}, \text{ а } n = \frac{1}{T}.$$
- За умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням 
$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$
- За умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра кола.
- За умови рівномірного руху по колу модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Як напрямлена швидкість тіла під час руху по колу?
2. Що таке період обертання й обертова частота? Як вони пов'язані?
3. Період обертання дорівнює 10 с. Чому дорівнює частота?
4. Чому дорівнює період обертання, якщо обертова частота дорівнює 10 1/с?
5. Чому дорівнює період обертання годинникової стрілки годинника? хвилинної? секундної?
6. Чому дорівнює період обертання Землі навколо Сонця?



7. Як пов'язані період обертання  $T$ , швидкість тіла  $v$  і радіус  $R$  кола під час рівномірного руху тіла по колу?
8. Як напрямлене прискорення тіла під час рівномірного руху по колу?

### Другий рівень

9. У скільки разів обертова частота хвилинної стрілки годинника більша за обертову частоту годинникової стрілки?
10. З якою швидкістю рухаються кінці годинникової, хвилинної та секундної стрілок настінного годинника? Вважайте, що довжина кожної з цих стрілок 10 см.
11. З яким доцентровим прискоренням рухається точка на ободі велосипедного колеса радіусом 0,5 м, якщо обертова частота дорівнює  $4 \frac{1}{с}$ ?
12. Оцініть, з якою швидкістю рухається Місяць навколо Землі. Радіус орбіти Місяця прийміть рівним 400 тис. км. Згадайтеся самі, який проміжок часу треба взяти за період.
13. Під час полярного дня полярник, який перебуває на крижині поблизу Північного полюса, здійснив «кругосвітню подорож» за одну добу по колу з центром у Північному полюсі так, що Сонце весь час було прямо перед ним. Який радіус цього кола, якщо він рухався зі швидкістю 4 км/год?
14. Який радіус кола, по якому їде автомобіль, якщо його прискорення при швидкості 72 км/год дорівнює половині прискорення вільного падіння?
15. Складіть задачу за темою «Рівномірний рух по колу», відповіддю якої було б «3 с».

- Механіка вивчає рух і взаємодію тіл.
- Кінематика описує рух тіл, але не вивчає взаємодію тіл.
- Механічним рухом називають зміну з часом положення тіла в просторі відносно інших тіл.
- Фізичну модель тіла, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають матеріальною точкою.
- Тіло відліку, пов'язані з ним система координат та годинник утворюють систему відліку.
- Лінію в просторі, уздовж якої рухається тіло, називають траєкторією руху тіла. Довжину траєкторії руху тіла називають шляхом, пройденим тілом.
- Переміщенням тіла за даний проміжок часу називають напрямлений відрізок, що сполучає положення тіла в початковий момент цього проміжку часу з положенням тіла в кінцевий момент цього проміжку часу. Переміщення є вектором.
- Прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого воно за будь-які рівні проміжки часу здійснює рівні переміщення.
- Швидкістю  $\vec{v}$  прямолінійного рівномірного руху називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення  $\vec{s}$  до проміжку часу  $t$ , за який відбулося це переміщення:  $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ .  
Швидкість — величина векторна. Під час прямолінійного рівномірного руху  $v = \frac{l}{t}$ .
- Графіком залежності шляху від часу за умови прямолінійного рівномірного руху є відрізок прямої, один кінець якого збігається з початком координат.
- Площа фігури під графіком залежності модуля швидкості від часу чисельно дорівнює шляху, пройденому тілом.
- Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло за рівні проміжки часу проходить різні шляхи.
- Середньою швидкістю нерівномірного руху  $\vec{v}_c$  за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює від-

ношенню переміщення  $\vec{s}$  до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$ .

- Прямолінійний рух, під час якого за будь-які рівні проміжки часу швидкість тіла змінюється на одну й ту саму величину, називають прямолінійним рівноприскореним рухом.
- Прискоренням  $\vec{a}$  називають векторну величину, що дорівнює відношенню зміни швидкості тіла  $\vec{v} - \vec{v}_0$  до проміжку часу  $t$ , за який ця зміна відбулася:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ .

- Падіння в умовах, коли опором повітря можна знехтувати, називають вільним падінням. Усі тіла, що вільно падають, рухаються з прискоренням  $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Його називають прискоренням вільного падіння. Розв'язуючи задачі, часто приймають  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
- За умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості:

$$\text{швидкість } \vec{v} = \vec{a}t,$$

$$\text{проекція швидкості } v_x = a_x t,$$

$$\text{проекція переміщення } s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

- За умови прямолінійного рівноприскореного руху з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ :

$$\text{швидкість } \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

$$\text{проекція швидкості } v_x = v_{0x} + a_x t,$$

$$\text{проекція переміщення.}$$

- За умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається незмінним, а напрям швидкості змінюється: у будь-якій точці траєкторії швидкість напрямлена по дотичній до кола в цій точці.
- Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають періодом обертання і позначають  $T$ . Число повних обертів за одну секунду називають обертовою частотою і позначають  $n$ . Період і частота є взаємооберненими величинами:  $T = \frac{1}{n}$ , а  $n = \frac{1}{T}$ .



- За умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням  $v = \frac{2\pi R}{T}$ .
- За умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра кола. Модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.

# 2 ДИНАМІКА

---

- § 6. Закон інерції — перший закон Ньютона
- § 7. Взаємодії та сили
- § 8. Другий закон Ньютона
- § 9. Третій закон Ньютона
- § 10. Закон всесвітнього тяжіння
- § 11. Сили тертя
- § 12. Рух і рівновага тіла  
під дією декількох сил
- § 13. Імпульс. Закон збереження імпульсу
- § 14. Механічна робота. Потужність
- § 15. Енергія

## § 6. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ — ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

---

1. Коли швидкість тіла змінюється?
2. Закон інерції
3. Інерціальні системи відліку та перший закон Ньютона
4. Застосування явища інерції
5. Чи очевидний перший закон Ньютона?

### 1. КОЛИ ШВИДКІСТЬ ТІЛА ЗМІНЮЄТЬСЯ?



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Ударте ключкою шайбу, що лежить на льоду, і вона почне рухатися (рис. 6.1). Отже, дія ключки на шайбу *змінює швидкість* шайби.



А якщо вдарити по шайбі, що рухається? І в цьому випадку її *швидкість зміниться*: ударом можна зупинити шайбу або надати їй швидкості в іншому напрямі.

Цей та інші подібні досліди і спостереження, з якими знайомий кожен із нас, показують, що *внаслідок дії на тіло інших тіл його швидкість змінюється*.

Але чи завжди це так? Чи може швидкість тіла *змінюватися*, хоча на нього *не діють* інші тіла?





## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Простежимо за рухом шайби по льоду після удару ключкою. Ми помітимо, що швидкість шайби *зменшується*. Це зменшення швидкості під час руху шайби набагато помітніше, якщо вона ковзатиме не по льоду, а по асфальту.

Яке ж тіло діє на шайбу, що ковзає, зменшуючи її швидкість? Адже ми не бачимо, щоб її щось тягнуло чи штовхало. Може, шайба гальмується «сама собою»? Але якщо це гальмування — властивість самої шайби, то чому на асфальті вона «гальмується» набагато сильніше, ніж на льоду?

Ви, певна річ, здогадалися: причиною зменшення швидкості шайби є *тертя*. Під час ковзання шайби по асфальту тертя набагато більше, ніж під час ковзання по льоду, ось чому після того самого удару шайба, рухаючись по асфальту, зупиняється набагато раніше, ніж коли вона рухається по льоду.

Першим, хто зрозумів, що швидкість тіла зменшується не «сама по собі», а внаслідок тертя, був Г. Галілей.

А ось інший приклад.



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Підніміть м'яч і відпустіть його. Він почне падати. Під час падіння, як ми вже знаємо, швидкість тіла *збільшується*.

Яке ж тіло діє на падаючий м'яч, прискорюючи його? Хіба ми бачимо, що його під час падіння щось тягне або штовхає?

Цим «невидимим» тілом, що діє на м'яч, є величезна Земля. Як не дивно, довгий час її не помічали саме через її величезність (згадаймо приказку «Усе велике бачиться далеко»). Земля *притягує* м'яч.

Першим, хто зрозумів, що прискорення падаючих тіл зумовлене притяганням Землі, був І. Ньютон. Про це ми докладніше розповімо в § 10. Закон всесвітнього тяжіння.

Але внаслідок притягання Землі швидкість тіла не обов'язково збільшується!



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Киньте м'яч вертикально вгору. Під час піднімання м'яча його швидкість *зменшується*.

Це зменшення швидкості також зумовлене притяганням м'яча Землею.

Отже, на підставі наших дослідів і спостережень ми можемо припустити, що

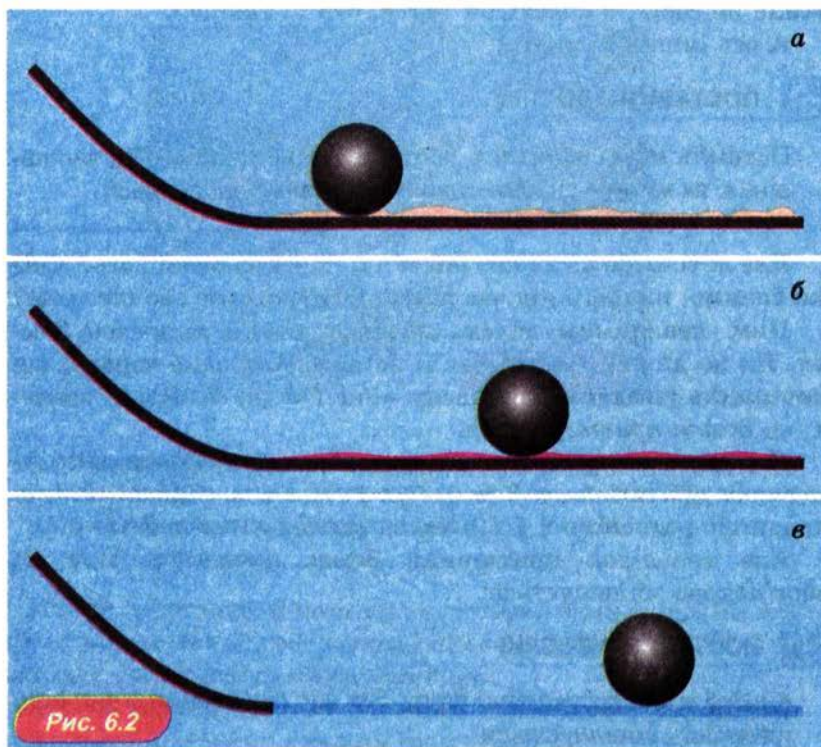
швидкість тіла змінюється внаслідок дії на нього інших тіл.

## 2. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ

Те, що швидкість тіла змінюється *тільки* внаслідок дії на це тіло інших тіл, першим припустив Галілей.

Галілей був першим серед учених, хто почав перевіряти свої припущення *на досліди*. Він скочував кулі з похилої площини (з тієї самої висоти) і спостерігав за їхнім подальшим рухом по *горизонтальній* поверхні. Учений помітив: що більш тверда й гладка ця поверхня, то *довше* котиться по ній куля.

Так, по посипаній піском поверхні куля прокотиться зовсім небагато (рис. 6.2, *а*), по тканині прокотиться набагато довше (рис. 6.2, *б*), а по гладкому склу котитиметься дуже довго (рис. 6.2, *в*). Але зрештою вона все-таки зупиниться.



На підставі своїх дослідів Галілей здогадався, що причиною зменшення швидкості кулі є *тертя*. Під час руху кулі по тканині тертя менше, ніж під час руху по піску, а під час руху по склу — ще менше. Але все-таки й у цьому випадку тертя є. Може, тільки тому куля зрештою й зупиняється?

І Галілей висловив геніальний здогад: він припустив, що якби тертя не було *зовсім*, куля котилася б з незмінною швидкістю *вічно*! Так було відкрито перший закон механіки. Його формулюють як

**закон інерції**: якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається прямолінійно рівномірно або зберігає стан спокою.

Тіло рухається з постійною (за модулем і напрямом) швидкістю й у тому разі, коли дії інших тіл, що діють на дане тіло, *скомпенсовані*. Приблизно так і відбувається з кулею, що котиться по склу: тертя при цьому дуже мале, а притягання кулі Землею компенсується тим, що скло тисне на кулю знизу вгору.

Те, що тіло *зберігає* свою швидкість, якщо на нього не діють інші тіла (або дії цих тіл скомпенсовані), називають *явищем інерції*. Про різноманітні застосування цього явища ми розповімо далі.

### 3. ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ТА ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Розпочате Г. Галілеєм у 16-му столітті відкриття законів механіки завершив у 17-му столітті І. Ньютон. Він сформулював систему основних законів механіки, яку згодом назвали «трьома законами Ньютона».

*Першим* з цих законів Ньютон узяв відкритий Галілеєм закон інерції<sup>1</sup>. Тому закон інерції називають також *першим законом Ньютона*.

Сучасне формулювання першого закону Ньютона ми наведемо трохи пізніше. У ньому враховується, що *закон інерції виконується не в усіх системах відліку*.

Наприклад, дослід показує, що він досить точно виконується в системі відліку, пов'язаній із Землею. А от, наприклад, у системі відліку, пов'язаній з автобусом, що їде міською вулицею, закон інерції не виконується: коли автобус ру-

<sup>1</sup> Ньютон визнавав за Галілеєм честь відкриття цього закону: він говорив про себе, що «стояв на плечах гігантів», одним з яких був Галілей.



шає з місця, пасажирів «кидає» назад, а коли автобус гальмує, пасажирів «кидає» уперед.

Системи відліку, у яких виконується закон інерції, називають *інерціальними*.

Те, що закон інерції досить точно виконується в системі відліку, пов'язаній із Землею, означає, що

пов'язану із Землею систему відліку досить точно можна вважати інерціальною системою відліку.

У наведеному далі формулюванні першого закону Ньютона зазначено, у яких системах відліку він справедливий.

*Перший закон Ньютона:* існують системи відліку, що називають інерціальними, у яких тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.

#### 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА ІНЕРЦІЇ

Перший закон Ньютона ми застосовуємо дуже часто. Наприклад, його застосовує кожен, хто кидає м'яч або розбігається для стрибка. І в тому, і в іншому випадку використовують *явище інерції* — те, що тіло зберігає швидкість і рухається «саме собою».

Використовує перший закон Ньютона і велосипедист, який, розігнавшись на рівному шосе, насолоджується якийсь час швидким рухом, не крутячи педалі.

Особливо ефектно використовують перший закон Ньютона в зимових видах спорту, де тертя вдається зробити особливо малим (рис. 6.3).

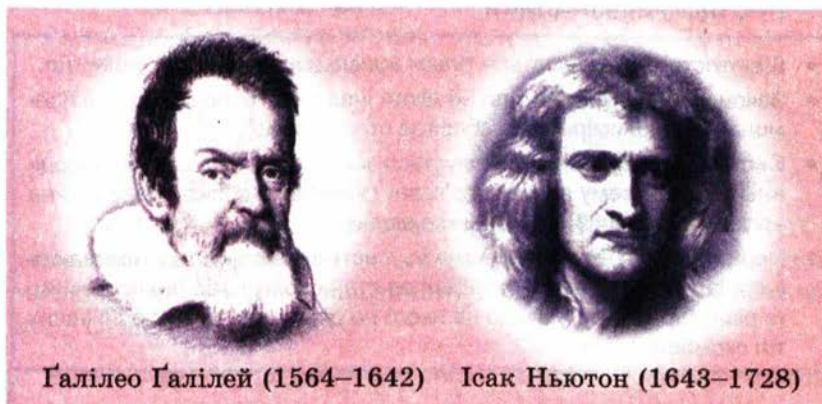
Однак перший закон Ньютона може бути і небезпечним, якщо його не враховувати. Наприклад, не можна різко гальмувати переднім гальмом, коли ви швидко їдете на велосипеді: «зберігаючи швидкість», ви можете вилетіти із сідла й перелетіти через руль!



Рис. 6.3

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Закон інерції (перший закон Ньютона) здається дуже простим. Але чому ж тоді його не відкрив давньогрецький учений Арістотель, який почав вивчати рух тіл за дві тисячі років до Галілея?



Галілео Галілей (1564–1642)    Ісак Ньютон (1643–1728)

Арістотель стверджував: щоб тіло рухалося, його необхідно «рухати». І спостереження дійсно вказують скоріше на те, що тіла «самі собою» не рухаються. Наприклад, коли кінь перестає тягти візок, візок зупиняється; коли стихає вітер, листя на деревах завмирає. Тому справедливість учення Арістотеля не викликала сумнівів дві тисячі років.

Галілей зробив принципово новий крок у вивченні руху: він перейшов від спостережень до *дослідів*. У цих дослідах він установив, що рух припиняється через цілком визначену причину — *через тертя*. І здогадався, що якби тертя можна було усунути зовсім, то тіло рухалося б «саме собою» вічно! Це й було відкриттям закону інерції.

Однак відкриття закону інерції зовсім не зробило його очевидним: з ним і сьогодні не погоджується здоровий глузд. І причина та ж сама, що заважала Арістотелю відкрити цей закон: ми *бачимо*, що тіла навколо нас не рухаються самі собою як завгодно довго! Як же не вірити власним очам?

Але річ у тім, що будь-який рух у «земному» світі, що оточує нас, супроводжується тертям — ми так само не помічаємо його, як не помічав колись і Арістотель.

Однак ми вже знаємо, що внаслідок тертя рух не зникає, а переходить з однієї форми в іншу: тіла нагріваються, тобто

збільшується швидкість хаотичного руху частинок, з яких складаються ці тіла.

Сьогодні, коли люди навчилися значно зменшувати тертя, здатність тіл зберігати рух уже не здається такою надзвичайною.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Швидкість тіла змінюється тільки внаслідок дії на нього інших тіл.
- Закон інерції: якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається прямолінійно рівномірно або зберігає стан спокою.
- Системи відліку, у яких виконується закон інерції, називають інерціальними. Систему відліку, пов'язану із Землею, досить точно можна вважати інерціальною системою відліку.
- Перший закон Ньютона: існують системи відліку, що називають інерціальними, у яких тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.

### ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Коли швидкість тіла змінюється?
2. Чи може швидкість тіла змінитися, якщо на нього не діють інші тіла?
3. Чи може швидкість тіла залишатися незмінною, хоча на нього діють інші тіла? Підтвердьте свою відповідь прикладом.
4. Сформулюйте закон інерції. Хто його відкрив?
5. У чому полягає явище інерції? Наведіть приклади цього явища.
6. Чому, коли струшувати мокру парасольку, з неї злітають краплі води?
7. Які системи відліку називають інерціальними?
8. Чи можна пов'язану із Землею систему відліку приблизно вважати інерціальною?
9. Сформулюйте перший закон Ньютона.
10. Наведіть приклади прояву і застосування першого закону Ньютона.
11. Чому небезпечно різко гальмувати переднім гальмом, коли ви швидко їдете на велосипеді?



## § 7. ВЗАЄМОДІЇ ТА СИЛИ

1. Сили в механіці
2. Чим характеризується кожна сила?
3. Приклади дії сил
4. Вимірювання сил
5. Додавання сил

### 1. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

Дії тіл одне на одне називають *взаємодією*. Взаємодію тіл описують за допомогою *сил*. Кожна сила характеризується числовим значенням і напрямом, тобто є *векторною* величиною. Отже,

сила — векторна величина, що є мірою дії одного тіла на інше.

Як показує дослід,

усі механічні явища зумовлені дією трьох видів сил: *сил пружності*, *сил всесвітнього тяжіння* і *сил тертя*.

З проявами цих сил ми вже ознайомилися коротко в попередньому параграфі. Нагадаймо про них.

1) Під час удару ключкою на шайбу з боку ключки діяла сила пружності.

*Сила пружності* виникає внаслідок деформації тіла, тобто зміни його форми або розмірів.

І дійсно, під час удару ключка трохи зігнулася. Сили пружності зумовлені взаємодією між частинками zdeформованого тіла.

2) На тіло, що падає, діє сила притягання з боку Землі.

Силу, з якою Земля притягує тіло, називають *силою тяжіння*. Сила тяжіння є проявом сил *всесвітнього тяжіння*.

Точку прикладання сили тяжіння називають *центром тяжіння* тіла.

Як ми невдовзі побачимо, сила тяжіння діє не тільки на тіла, що падають.

3) Під час ковзання шайби по льоду на неї діяла сила тертя з боку льоду.

*Сили тертя ковзання діють між тілами, що стикаються, рухаючись одне відносно одного.*

Сили тертя ковзання зумовлені чіпанням нерівностей на поверхнях тіл, що стикаються.

### **ЧИ МОЖУТЬ СИЛИ ВРІВНОВАЖУВАТИ ОДНА ОДНУ?**

Як ми бачили на попередніх прикладах, якщо швидкість тіла змінюється, це означає, що на нього діє сила.

А чи правильне протилежне твердження? Коли швидкість тіла не змінюється (наприклад, книга лежить на столі), чи означає це, що на тіло не діють жодні сили?

Ні, це не завжди так! Наприклад, якщо книга лежить на столі, то на неї діють сила тяжіння та сила пружності з боку стола. А книга залишається у спокої тому, що сила тяжіння і сила пружності *врівноважують* одна одну. Отже,

сили можуть врівноважувати одна одну.

## **2. ЧИМ ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ КОЖНА СИЛА?**

На попередніх прикладах ми бачили, що

будь-яка сила прикладена до тіла з боку якогось *іншого* тіла.

Це означає, що в розповіді про будь-яку силу має бути *дві* «дійові особи»: тіло, *до якого* прикладено цю силу, і тіло, *з боку якого* прикладено цю силу.

Крім того,

кожна сила характеризується: 1) числовим значенням (модулем); 2) напрямом; 3) точкою прикладання.

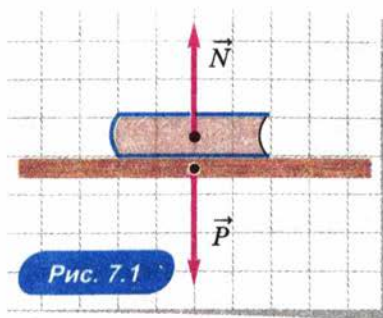
На рисунках сили, як і решту векторних величин, позначають стрілками. Початок стрілки збігається з точкою прикладання сили, напрям стрілки показує напрям сили, а довжина стрілки пропорційна модулю сили. Якщо тіло можна вважати матеріальною точкою, то точки прикладання всіх сил, що діють на тіло, можна розмістити на рисунку в одній точці. У наступному розділі ми розглянемо кілька прикладів.

**Одиницю сили** на честь Ньютона називають *ньютон* (Н). З означенням цієї одиниці сили ми ознайомимось трохи пізніше (див. § 8. *Другий закон Ньютона*), а зараз зауважимо тільки, що 1 Н — невелика сила. Так, коли ви тримаєте на

долоні літровий пакет молока або соку, цей пакет тисне на долоню із силою, що дорівнює приблизно 10 Н.

### 3. ПРИКЛАДИ ДІЇ СИЛ

На рисунку 7.1 зображено сили пружності, з якими діють одне на одного стіл і книга, що лежить на ньому.



Силу, з якою книга тисне на стіл, називають *вагою* книги.

*Вагою* тіла називають силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс.

Вагу зазвичай позначають  $\vec{P}$ . Зауважимо, що

вага тіла в спокої дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.

Ми доведемо це в § 9. *Третій закон Ньютона.*

Проте вага і сила тяжіння — це *різні* сили: вага тіла діє на опору (або підвіс) з боку тіла, а сила тяжіння діє на саме тіло з боку Землі. Природа цих сил також різна.

Силу, з якою стіл тисне на книгу знизу вгору, називають *силою нормальної реакції* і позначають  $\vec{N}$ . Така назва пояснюється тим, що ця сила напрямлена перпендикулярно до поверхні стола, а перпендикуляр іноді називають *нормаллю*.

Наприклад, на рисунку 7.2 зображено сили, що діють на книгу, яка лежить на столі. Це сила тяжіння  $\vec{F}_T$ , яка діє з боку Землі, та сила нормальної реакції  $\vec{N}$ . Книга перебуває у спокої, адже ці сили врівноважують<sup>1</sup> одна одну.

<sup>1</sup> Якщо сили, що діють на тіло, урівноважують одна одну, кажуть також, що дії цих сил скомпенсовані.



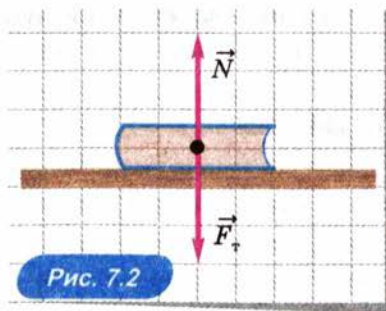


Рис. 7.2

Якщо дві сили врівноважують одна одну, то вони рівні за модулем і напрямлені протилежно.

#### 4. ВИМІРЮВАННЯ СИЛ

Ви вже знаєте, що сила пружності зумовлена деформацією тіла. При цьому чим більша деформація, тим більшою є сила пружності. Отже,

з деформації тіла можна судити про значення сили пружності.

Для вимірювання сил на практиці використовують властивість сили пружності, відкриту в 17-му столітті англійським фізиком Р. Гуком.

**Закон Гука.** Підвішуючи до пружини різну кількість однакових вантажів (рис. 7.3), Гук установив на досліді, що

модуль сили пружності  $F_{\text{пр}}$  прямо пропорційний видовженню пружини  $x$ . Співвідношення між модулем сили пружності та модулем видовження пружини можна записати у вигляді

$$F_{\text{пр}} = k |x|.$$

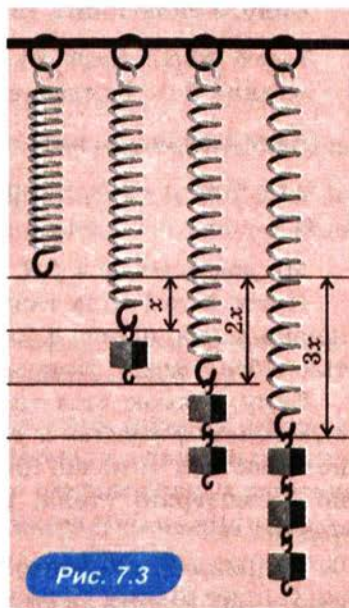


Рис. 7.3

Закон Гука іноді записують у вигляді  $F_{\text{пр}} = -kx$ . При цьому мають на увазі проекцію сили пружності на вісь  $x$ .

Коефіцієнт пропорційності  $k$  називають *жорсткістю пружини*. Як видно з наведеної формули, одиницею жорсткості є  $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Прилад для вимірювання сили за допомогою деформації пружини називають *пружинним динамометром*. На рисунку 7.4, *а* зображено шкільний динамометр, а на рисунку 7.4, *б* — його будову.

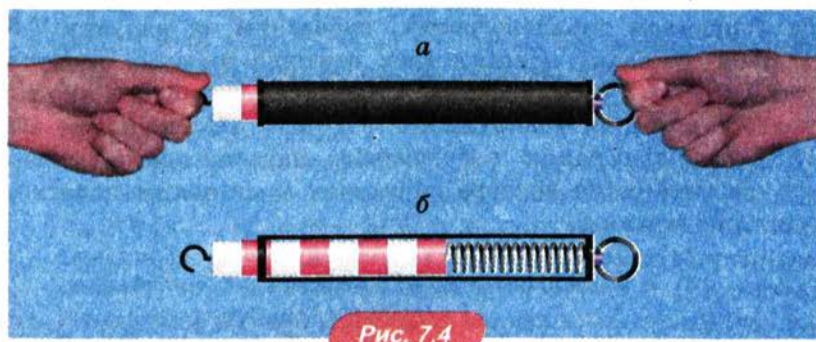


Рис. 7.4

## 5. ДОДАВАННЯ СИЛ

Досліди свідчать, що коли тіло можна розглядати як матеріальну точку, дію на тіло декількох сил можна замінити дією *однієї* сили.

Силу, що діє на тіло так само, як декілька одночасно прикладених до цього тіла сил, називають *рівнодійною* цих сил. Знаходження рівнодійної декількох сил називають *додаванням* цих сил.

Оскільки сили є векторними величинами, їх

додають за правилом додавання векторів.

Якщо дві сили напрямлені *однаково*, їх рівнодійна напрямлена так само, а модуль рівнодійної дорівнює сумі модулів сил-доданків. На рисунку 7.5, *а* наведено приклад додавання

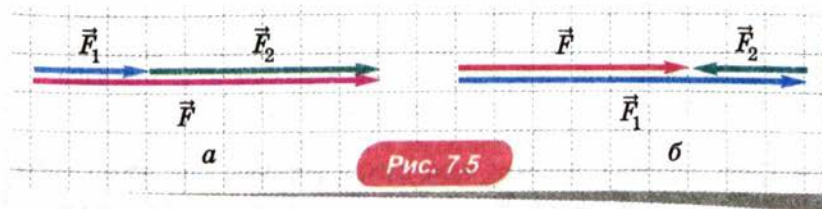
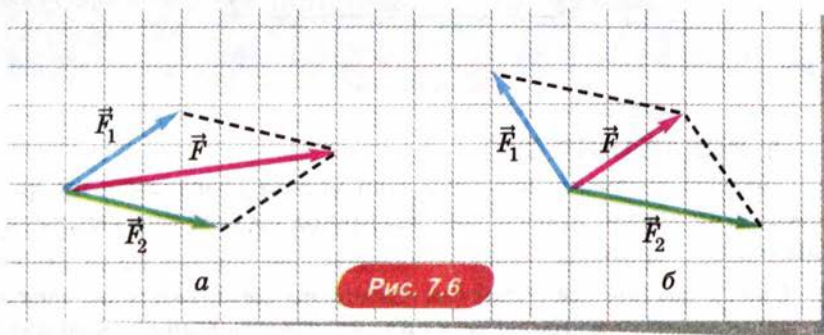


Рис. 7.5

таких сил. Сили-доданки позначено синьою та зеленою стрілками, а їх рівнодійну  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  — червоною стрілкою.

Якщо дві не рівні за модулем сили напрямлені *протилежно*, їх рівнодійна напрямлена в бік більшої сили, а модуль рівнодійної дорівнює різниці модулів сил-доданків. На рисунку 7.5, б наведено приклад додавання таких сил. Позначення ті ж самі, що на попередньому рисунку.

Якщо сили напрямлені *під кутом одна до одної*, то їх рівнодійну визначають, використовуючи додавання векторів за «правилом паралелограма», наведеним на рисунку 7.6. У цьому випадку початки двох векторів-доданків сполучають і будують паралелограм, суміжними сторонами якого є вектори-доданки. Рівнодійна  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  є вектором, що збігається з діагоналлю побудованого паралелограма, причому початок цього вектора збігається зі спільним початком векторів-доданків.



На рисунку 7.6, а наведено приклад додавання сил, коли кут між силами-доданками гострий, а на рисунку 7.6, б — коли цей кут тупий.

Як ми вже знаємо,

якщо рівнодійна двох сил дорівнює нулю, то ці сили рівні за модулем і напрямлені протилежно.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Сила — векторна величина, що є мірою дії одного тіла на інше.
- Усі механічні явища зумовлені дією трьох видів сил: сил пружності, сил тяжіння та сил тертя.
- Сила пружності виникає внаслідок деформації тіла, тобто зміни його форми або розмірів.



- Силу, з якою Земля притягає тіло, називають силою тяжіння. Сила тяжіння є проявом сил всесвітнього тяжіння.
- Сили тертя ковзання діють між тілами, що стикаються, рухаючись одне відносно одного.
- Будь-яку силу прикладено до тіла з боку іншого тіла. Кожна сила характеризується: 1) числовим значенням (модулем); 2) напрямом; 3) точкою прикладання.
- Вагою тіла називають силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс. Вага тіла у спокої дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.
- Силу, з якою опора тисне на тіло, називають силою нормальної реакції. Вона напрямлена перпендикулярно поверхні опори.
- Якщо дві сили врівноважують одна одну, то вони рівні за модулем і напрямлені протилежно.
- Закон Гука: модуль сили пружності  $F_{\text{пр}}$  прямо пропорційний видовженню пружини  $x$ . Закон Гука можна записати у вигляді:  $F_{\text{пр}} = k |x|$ .
- Силу, що діє на тіло так само, як декілька одночасно прикладених до цього тіла сил, називають рівнодійною цих сил.
- Знаходження рівнодійної декількох сил називають додаванням цих сил. Сили додають за правилом додавання векторів.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Дією яких трьох видів сил зумовлені механічні явища?
2. Наведіть приклад дії сили пружності.
3. Яку силу називають силою тяжіння?
4. Наведіть приклад дії сили тяжіння.
5. Наведіть приклад дії сили тертя ковзання.
6. Що можна сказати про модулі та напрями двох сил, які врівноважують одна одну?
7. Чим характеризується кожна сила?
8. Наведіть приклад сил, з якими два тіла діють одне на одне.
9. Що таке вага тіла? Як вона пов'язана із силою тяжіння?
10. Що таке сила нормальної реакції?
11. Сформулюйте закон Гука.
12. За умови однакового видовження двох пружин з боку першої пружини діє сила пружності 2 Н, а з боку другої — 6 Н. Жорсткість якої пружини більша? У скільки разів?
13. Видовження першої пружини дорівнює 2 см, а видовження другої — 6 см. При цьому з боку цих пружин діють однакові сили пружності. Жорсткість якої пружини більша? У скільки разів?

14. Унаслідок розтягування пружини на 5 см виникає сила пружності 10 Н. Чому дорівнює жорсткість цієї пружини?
15. Що називають рівнодійною декількох сил?
16. Дві сили напрямлені однаково. Перша сила дорівнює 5 Н, а рівнодійна двох сил 7 Н. Чому дорівнює модуль другої сили?

### Другий рівень

17. Чи однаковий напрям сили тяжіння для всіх жителів Харкова? для всіх жителів Землі?
18. Що спільного у ваги і сили тяжіння і чим вони відрізняються?
19. Під час розтягування першої пружини на 10 см виникає сила пружності 100 Н, а під час розтягування другої пружини на 5 см виникає сила пружності 20 Н. Жорсткість якої пружини більша і в скільки разів?
20. Коли довжина пружини 14 см, сила пружності дорівнює 20 Н, а коли довжина пружини 18 см, сила пружності дорівнює 60 Н. Яка довжина недеформованої пружини? Чому дорівнює жорсткість пружини?
21. Модуль рівнодійної двох сил, що діють вздовж однієї прямої, дорівнює 5 Н. Модуль першої сили дорівнює 3 Н. Якою може бути модуль другої сили?
22. Дві сили напрямлені перпендикулярно одна одній. Модуль першої сили 3 Н, а модуль другої сили 4 Н. Чому дорівнює модуль рівнодійної цих сил?
23. Складіть задачу за темою «Взаємодії та сили», відповіддю якої було б «Направлені протилежно».

## § 8. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Співвідношення між силою та прискоренням
2. Маса
3. Другий закон Ньютона
4. Рух тіла під дією сили тяжіння
5. Чи очевидний другий закон Ньютона?

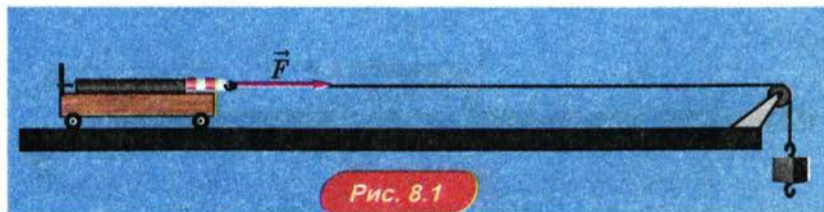
### 1. СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ СИЛОЮ ТА ПРИСКОРЕННЯМ



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІДИ

Вивчимо на досліді, як рухається тіло, якщо на нього діє тільки *одна постійна сила*, а дії інших сил скомпенсовані. Для наших дослідів скористаємося візком, що може котитися по столу практично без тертя<sup>1</sup>.

З'ясуємо, як рухається візок під дією прикладеної до нього горизонтальної сили. Для вимірювання цієї сили зручно закріпити динамометр на самому візку (рис. 8.1). З'єднаємо ниткою візок і вантаж, а потім перекинемо нитку через блок.



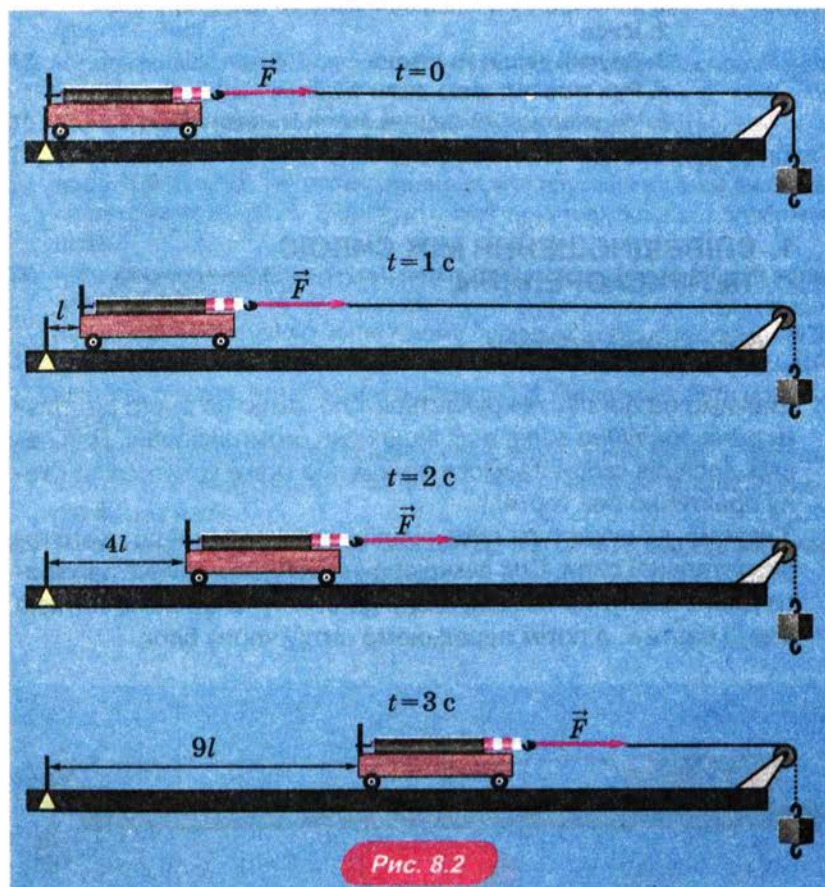
Візок почне катитися по столу, і його швидкість збільшуватиметься. З показів динамометра можна зробити висновок, що на візок під час руху діє *постійна сила*.

Вимірюючи шляхи, які проходить візок за різні проміжки часу, можна помітити, що шлях пропорційний *квадрату* часу руху (рис. 8.2; на всіх рисунках, крім першого, вантаж розташова-

<sup>1</sup> Для демонстрації подібних дослідів розроблено спеціальний прилад, у якому візок рухається на «повітряній подушці» — у цьому випадку тертя особливо мале.



ний нижче від зображеного положення, тому нитку позначено пунктиром). А це означає (див. § 4. Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху), що візок рухається рівноприскорено.



Отже, цей та інші подібні досліди показують, що

під дією постійної сили тіло рухається з постійним прискоренням.

З'ясуємо тепер, як пов'язані модуль прискорення тіла і модуль сили, що діє на тіло.

Змінювати силу, що діє на візок, можна, підвішуючи до нитки різні вантажі. Виміряють модуль цієї сили за показами динамометра.

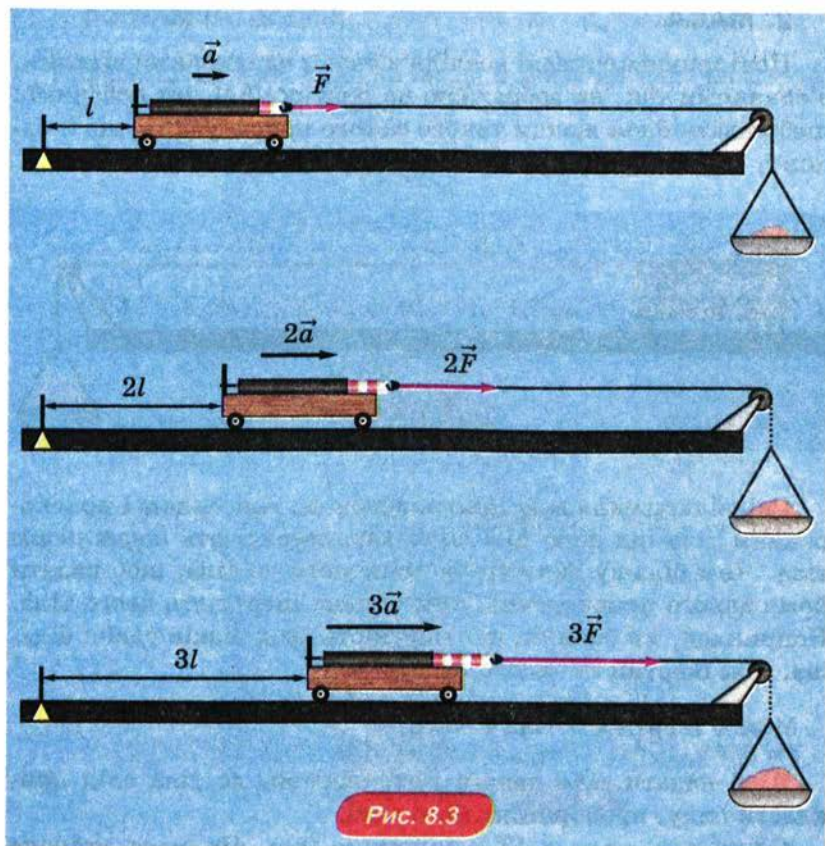


Рис. 8.3

Із формули  $l = \frac{at^2}{2}$  випливає, що шлях, пройдений візком за той самий проміжок часу, пропорційний прискоренню візка. Виміри показують, що цей шлях пропорційний силі, яка діє на візок (рис. 8.3; на всіх рисунках, крім першого, вантаж розташований нижче від зображеного положення, тому нитку позначено пунктиром). А це означає, що

модуль прискорення тіла пропорційний модулю сили, яка діє на це тіло.

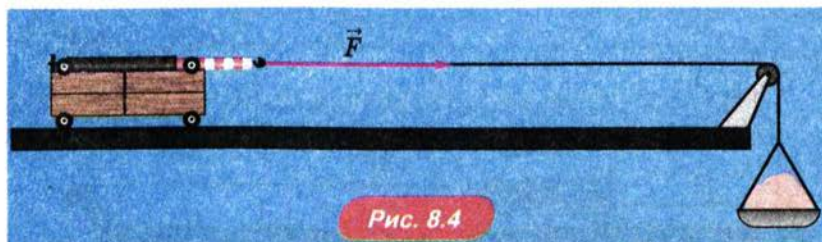
Наші досліди показують також, що

напрямок прискорення тіла збігається з напрямом сили, яка діє на тіло.



## 2. МАСА

Повторивши описані досліди з двома однаковими візками, з'єднаними так, як зображено на рисунку 8.4, ми побачимо: щоб надати двом візкам такого самого прискорення, що й одному, до них треба прикласти вдвічі більшу силу.



Співвідношення між прикладеною до тіла силою і прискоренням тіла під дією цієї сили характеризують *інертністю* тіла. Чим більшу силу треба прикласти до тіла, щоб надати йому даного прискорення, тим більша інертність цього тіла. Наприклад, ми бачили, що інертність двох візків удвічі більша, ніж інертність одного візка.

Мірою інертності тіла є *маса*.

Щоб надати тілу даного прискорення, до тіла слід прикласти силу, пропорційну його масі.

Одиницею маси в SI є кілограм (кг). Це маса еталона (зразка), яким служить циліндр, що зроблений зі спеціального сплаву і зберігається в Міжнародному бюро мір і ваги у Франції. Приблизно можна вважати, що 1 кг дорівнює масі 1 л прісної води<sup>1</sup>.

Використовують також частинні та кратні одиниці маси: 1 грам (г), що дорівнює 0,001 кг, а також 1 тону (т), що дорівнює 1000 кг.

Зверніть увагу: *інертність* — це властивість *тіла*! Не плутайте інертність з уже знайомим нам *явищем інерції*, яке полягає в тому, що тіло зберігає свою швидкість незмінною, якщо на нього не діють інші тіла (або дії інших тіл скомпенсовані).

Інертність мають усі тіла, та особливо наочно властивість інертності виявляється у масивних тіл. Покажемо це на ефектному досліді.

<sup>1</sup> Через те й було вибрано таку одиницю маси: її легко відтворити з точністю, достатньою для багатьох випадків.





## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Підвісимо масивну кулю на нитці, а знизу до кулі прикріпимо таку саму нитку (рис. 8.5).

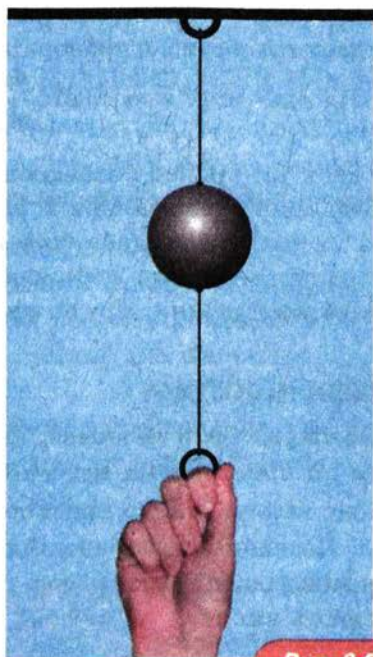


Рис. 8.5

Якщо потягнути за нижню нитку *плавно*, то розірветься *верхня* нитка. Цього можна було очікувати: адже верхня нитка розтягнута ще й вагою кулі. Але якщо *різко смикнути* нижню нитку, то розірветься не верхня, а *нижня* нитка!

Річ у тім, що під час різкого ривка *масивна* куля через інертність не встигне зрушитися настільки, щоб помітно розтягнути верхню нитку.

А от інший схожий дослід. На двох нитках підвішують дерев'яну паличку (можна взяти олівець). Якщо плавно натиснути рукою на паличку, то одна з ниток розірветься. Але якщо *різко вдарити* по середині палички металевим стержнем, то паличка зламається, а обидві нитки *залишаться цілими*! Річ у тім, що за короткий час удару паличка, що має інертність, не встигає зміститися так, щоб помітно розтягнути нитки.

## ЯК ПОРІВНЯТИ МАСИ ДВОХ ТІЛ?

Досліди показують, що маси  $m_1$  і  $m_2$  двох тіл можна *порівнювати*, порівнюючи прискорення цих тіл під час взаємодії між ними.

Відношення мас двох тіл обернено пропорційне відношенню прискорень цих тіл під час їх взаємодії:  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ .

Але якщо маси двох тіл під час їх взаємодії можна порівнювати, то масу будь-якого тіла можна й *виміряти*, порівнявши його масу з масою еталона (або його копії) — масою 1 кг. На практиці, однак, масу тіла виміряють набагато простіше — за допомогою *зважування*. Про це ми розповімо далі.

## 3. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

З викладеного можна зробити висновок, що *сила дорівнює добутку маси тіла на прискорення, яке надається цією силою*. Якщо на тіло діє кілька сил, то прискорення тілу надає *рівнодійна* цих сил. Позначимо цю рівнодійну  $\vec{F}$ .

Співвідношення між рівнодійною, масою тіла та його прискоренням формують як

*другий закон Ньютона: рівнодійна всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:*

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

*Другий закон Ньютона справедливий тільки в інерціальних системах відліку*, адже тільки в цих системах відліку прискорення тіла зумовлене силами, що діють на нього.

Використовуючи другий закон Ньютона, можна знайти прискорення  $\vec{a}$  тіла, якщо відома маса  $m$  тіла і рівнодійна  $\vec{F}$  всіх сил, що діють на це тіло. Для цього другий закон Ньютона записують у вигляді

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

Такий запис означає, що модуль прискорення тіла  $a = \frac{F}{m}$ , а напрям прискорення збігається з напрямом сили.

Як ми вже говорили, одиницю сили «ньютон» (Н) визначають за допомогою другого закону Ньютона. А саме:

1 Н дорівнює силі, яка тілу масою 1 кг надає прискорення  $1 \text{ м/с}^2$ . Отже,  $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$ .

#### 4. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Розглянемо рух тіла під дією однієї сили. Для тіла, що перебуває поблизу поверхні Землі, такою *єдиною* силою може бути тільки *сила тяжіння*, адже вона діє на *всі* тіла.

##### ЧОМУ ДОРІВНЮЄ СИЛА ТЯЖІННЯ?

Як ви вже знаєте, досліди показують, що під час вільного падіння всі тіла поблизу поверхні Землі рухаються з *однаковим* прискоренням, яке називають *прискоренням вільного падіння*  $\vec{g}$ .

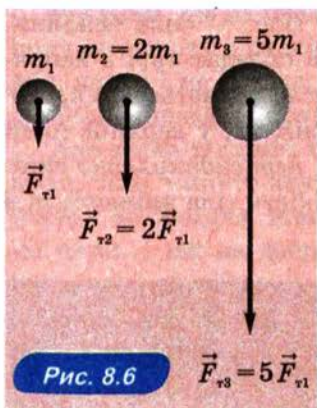
Це прискорення зумовлене дією на тіло сили тяжіння  $\vec{F}_T$ . Таким чином, другий закон Ньютона для тіла, що вільно падає, має вигляд:

$$\vec{F}_T = m\vec{g}.$$

Отже,

сила тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ , де  $m$  — маса тіла.

Завдяки тому, що сила тяжіння пропорційна масі тіла (рис. 8.6), можна вимірювати масу тіла за допомогою *зважування*. Адже, зважуючи тіло в стані спокою, ми вимірюємо силу тяжіння, що діє на нього, тому що для тіла в стані спокою вага дорівнює силі тяжіння.

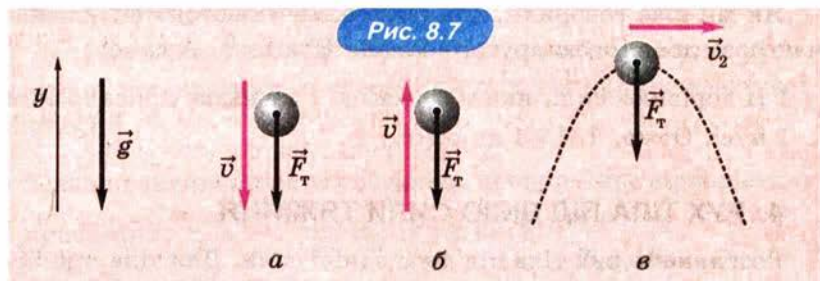


##### ЧИ ПОВ'ЯЗАНИЙ НАПРЯМ ШВИДКОСТІ ТІЛА З НАПРЯМОМ СИЛИ, ЩО ДІЄ НА НЬОГО?

Для тіла, що падає зі стану спокою, напрям швидкості *збігається* з напрямом сили тяжіння (рис. 8.7, а). При цьому швидкість *збільшується* з часом; залежність модуля швидкості від часу виражається формулою  $v = gt$ .



Рис. 8.7



Якщо тіло кинуте вертикально вгору, то під час руху вгору швидкість тіла напрямлена протилежно силі тяжіння (рис. 8.7, б). Тому й прискорення тіла теж напрямлене протилежно швидкості. Отже, швидкість тіла зменшуватиметься з часом. Залежність проекції швидкості від часу за умови рівноприскореного руху завжди має вигляд  $v_y = v_{0y} + g_y t$ , де  $v_0$  — модуль початкової швидкості, а залежність модуля швидкості від часу в цьому випадку виражається формулою  $v = v_0 - gt$ , оскільки  $g_y = -g$  (рис. 8.7).

Якщо кинути тіло під деяким кутом, то і в цьому випадку прискорення тіла під час усього польоту напрямлене вниз, адже так напрямлена сила, що діє на тіло, — сила тяжіння. Однак тепер початкова швидкість тіла складає кут з напрямком сили. При цьому, як ми бачимо, тіло рухається по криволінійній траєкторії (рис. 8.7, в). Наприклад, у верхній точці траєкторії швидкість тіла напрямлена перпендикулярно силі. Під час руху поблизу цієї точки швидкість тіла змінюється в основному за напрямом.

Цей випадок особливо цікавий, адже сила притягання, що діє на планету з боку Сонця, напрямлена також перпендикулярно до швидкості планети (рис. 8.8). Ця сила викликає напрямлене до Сонця прискорення планети під час її руху по коловій орбіті. Можна сказати, що під час свого руху навколо Сонця планета ніби весь час перебуває у «верхній точці траєкторії»!

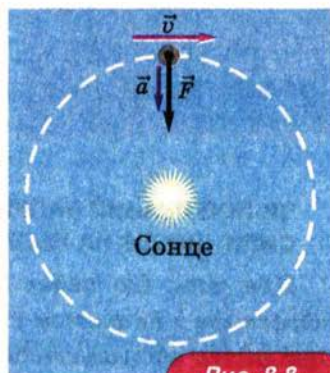


Рис. 8.8

Отже, з нашого розгляду випливає такий висновок:

швидкість тіла може бути напрямлена *під будь-яким кутом* до сили, що діє на тіло.

Якщо в заданій точці траєкторії напрям швидкості *збігається* з напрямом сили, то тіло рухається прямолінійно, причому швидкість тіла *збільшується*, а якщо напрям швидкості *протилежний* напрямку сили, то тіло рухається прямолінійно, причому швидкість тіла *зменшується*. Якщо ж швидкість напрямлена *під кутом* до напрямку сили, то траєкторія руху тіла *криволінійна*.

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Другий закон Ньютона так само не очевидний, як і перший: він теж начебто суперечить «здоровому глузду».

Заснований на спостереженнях «здоровий глузд» підказує нам, що швидкість тіла нібито завжди напрямлена так само, як і сила, що діє на це тіло. Але, розглядаючи рух тіла під дією сили тяжіння, ми переконалися, що це не завжди так: швидкість тіла може бути напрямлена *під будь-яким кутом* до сили, що діє на тіло. Через що ж виникає ця розбіжність «здорового глузду» з науковим розглядом?

Річ у тім, що на практиці ми часто стикаємося з випадками, коли початкова швидкість тіла дорівнює нулю. А в цих випадках, як ми вже знаємо, швидкість, якої набуває тіло внаслідок дії сили, справді напрямлена так само, як і ця сила.

Але якщо тіло має певну початкову швидкість (як, наприклад, тіло, кинуте вертикально вгору або під кутом до горизонту), то напрям швидкості вже не збігається з напрямом дії сили. І ми на добре знайомих прикладах переконалися, що це дійсно так.

Науковий підхід відрізняється від так званого «здорового глузду» тим, що він заснований не на випадкових спостереженнях, а на продуманих дослідах, у яких вивчають *усі* можливі варіанти перебігу природних явищ, а не тільки ті, що трапляються найчастіше.

Повертаючись до неочевидності другого закону Ньютона, звернемо увагу на те, що відповідно до цього закону сила, яка діє на тіло, визначає не швидкість цього тіла, а тільки *зміну швидкості* за найближчий малий проміжок часу. Тому швидкість тіла в цей момент залежить ще й від того, як напрямлена початкова швидкість тіла.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Маса є мірою інертності тіла.
- Відношення мас двох тіл обернено пропорційне відношенню прискорень цих тіл під час їх взаємодії:  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ .
- Другий закон Ньютона: рівнодійна всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .
- Сила тяжіння  $\vec{F}_\tau = m\vec{g}$ , де  $m$  — маса тіла. Завдяки тому, що сила тяжіння пропорційна масі тіла, масу можна вимірювати зважуванням.
- Швидкість тіла може бути напрямлена під будь-яким кутом до сили, що діє на тіло. Якщо швидкість тіла напрямлена так само, як сила, тіло рухається прямолінійно і його швидкість збільшується; якщо швидкість напрямлена протилежно напрямку сили, тіло рухається прямолінійно і його швидкість зменшується; якщо швидкість напрямлена під кутом до напрямку сили, тіло рухається криволінійно.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Що таке маса тіла?
2. Унаслідок взаємодії двох тіл перше тіло набуває прискорення  $1 \text{ м/с}^2$ , а друге —  $5 \text{ м/с}^2$ . Маса якого тіла більша і в скільки разів?
3. Сформулюйте другий закон Ньютона.
4. Під дією сили  $6 \text{ Н}$  тіло набуває прискорення  $2 \text{ м/с}^2$ . Яка маса тіла?
5. Чому дорівнює сила тяжіння для тіла масою  $5 \text{ кг}$ ?
6. На людину діє сила тяжіння  $600 \text{ Н}$ . Яка маса людини?
7. У яких системах відліку справедливий другий закон Ньютона?
8. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла збігається з напрямом сили, що діє на нього.
9. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла протилежний напрямку сили, що діє на нього.
10. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла перпендикулярний напрямку сили, що діє на нього.

### Другий рівень

11. Тіло масою  $5 \text{ кг}$ , рухаючись прямолінійно рівноприскорено, за  $5 \text{ с}$  пройшло  $25 \text{ м}$ . Чому дорівнює модуль рівнодійної сил, що діють на це тіло? Початкова швидкість тіла дорівнює нулю.



12. Гальмівний шлях автомобіля, що рухався зі швидкістю 108 км/год, дорівнює 90 м. Чому дорівнює сила тертя, якщо маса автомобіля 1 т?
13. М'яч кинули вертикально вгору. Коли модуль прискорення м'яча більший — під час піднімання чи під час спуску? Урахуйте, що сила опору повітря напрямлена протилежно швидкості тіла.
14. М'яч кинули вертикально вгору. У якій точці траєкторії прискорення м'яча точно дорівнює прискоренню вільного падіння? Розв'язуючи задачу, урахуйте силу опору повітря.
15. На тіло масою 10 кг діють дві сили, напрямлені вздовж однієї прямої. Тіло рухається з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ . Модуль однієї сили дорівнює 50 Н. Чому дорівнює модуль іншої сили?
16. На тіло масою 100 кг діють дві сили, напрямлені під прямим кутом одна до одної. Модуль однієї сили 300 Н, а модуль іншої сили 400 Н. З яким прискоренням рухається тіло?

## § 9. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Третій закон Ньютона
2. Властивості сил, з якими тіла взаємодіють
3. Приклади виявлення та застосування третього закону Ньютона
4. Вага і невагомість
5. Чи очевидний третій закон Ньютона?
6. Межі застосовності законів Ньютона

### 1. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Спостереження і досліди свідчать, що під час взаємодії двох тіл на *кожне* з них діє сила з боку *іншого* тіла. Наприклад, якщо ви б'єте рукою по м'ячу, то відчуваєте, що і м'яч «б'є» по вашій руці.

Це означає, що

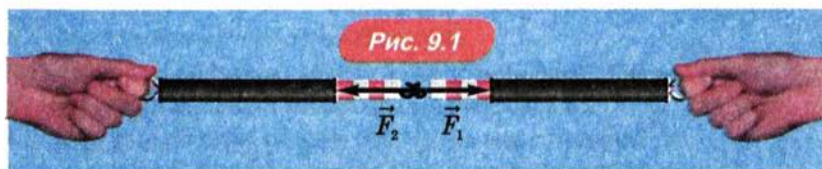
під час взаємодії тіла діють одне на одне з певними силами.

Яке ж співвідношення між силами?



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

З'єднаємо два динамометри і тягтимемо їх у різні боки, як показано на рисунку 9.1.



Ми побачимо, що покази динамометрів будуть *однаковими*.

Цей та інші подібні досліди свідчать, що виконується *третій закон Ньютона*: під час взаємодії тіла діють одне на одне із силами, що рівні за модулем і протилежні за напрямом:

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

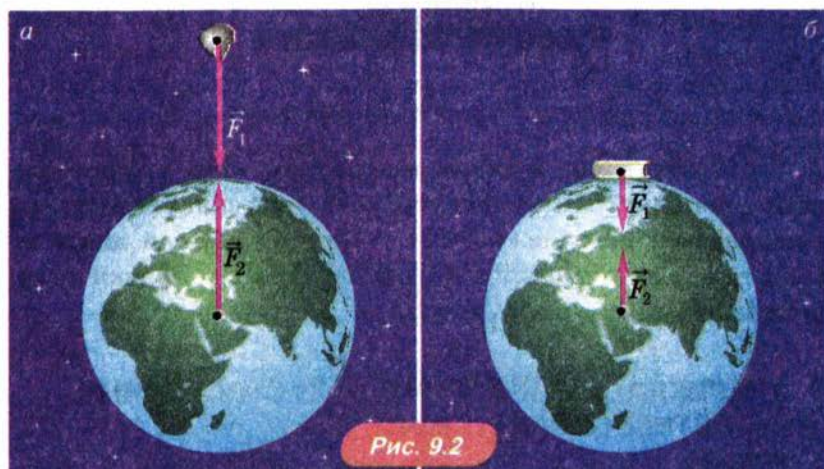
## 2. ВЛАСТИВОСТІ СИЛ, З ЯКИМИ ТІЛА ВЗАЄМОДІЮТЬ

Сили, з якими взаємодіють два тіла, мають *однакову фізичну природу*.

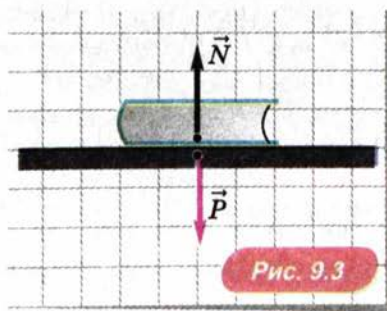
Розглянемо приклади.

1. На будь-яке тіло, що перебуває поблизу поверхні Землі, діє сила *тяжіння* з боку Землі.

Ця сила діє на тіло незалежно від того, падає воно (рис. 9.2, *а*) чи перебуває у спокої (рис. 9.2, *б*). З боку тіла на Землю діє сила притягання, що точно дорівнює за модулем силі тяжіння. Чому ж дія цієї сили на Землю залишається непомітною? Далі ми розповімо про це.

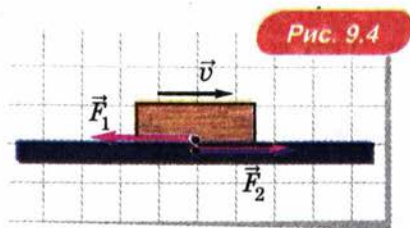


2. Книга, що лежить на столі (рис. 9.3), тисне на опору із силою  $\vec{P}$  (вага книги), а стіл — на книгу із силою  $\vec{N}$  (сила нормальної реакції). Обидві ці сили за своєю фізичною природою є *силами пружності*.





3. Якщо штовхнути брусок, що лежить на столі, він почне ковзати по столу — проїде деяку відстань і зупиниться. Зменшення швидкості бруска під час ковзання зумовлене *силою тертя*, що діє на нього з боку стола. Така ж за модулем, але протилежно напрямлена сила тертя діє й на стіл з боку бруска (рис. 9.4). Дію сили тертя на стіл можна зробити помітнішою, якщо покласти на стіл тканину: ми побачимо, що брусок, рухаючись, «тягне» тканину за собою.



Чи можуть сили, з якими взаємодіють тіла, урівноважувати одна одну? Ні, не можуть, хоча вони рівні за модулем і напрямлені протилежно! Річ у тім, що ці сили діють на *різні* тіла, а врівноважувати одна одну можуть тільки сили, прикладені до *того самого* тіла.

### 3. ПРИКЛАДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТРЕТЬОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА

#### ХОДЬБА

Кожен із дитинства застосовує третій закон Ньютона на кожному кроці, навіть не підозрюючи про це.

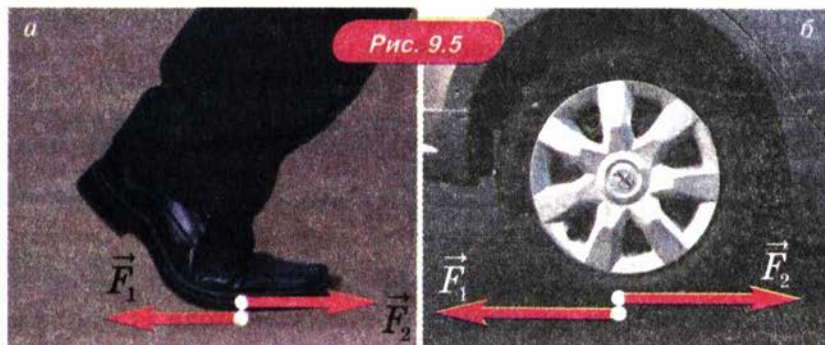
Наприклад, починаючи йти, ви набуваєте *прискорення в горизонтальному напрямі*. Згідно з другим законом Ньютона це означає, що на вас діє *горизонтально напрямлена сила*. Що ж це за сила? З боку якого тіла її прикладено?

Цією силою є *сила тертя*, що діє з боку дороги<sup>1</sup> на людину, яка йде. Людина штовхає *дорогу* назад, а дорога при цьому *відповідно до третього закону Ньютона* з такою самою за модулем силою штовхає *людину* вперед (рис. 9.5, а)!

#### СИЛА ТЯГИ

Автомобіль розганяється, теж «використовуючи» третій закон Ньютона: мотор обертає колесо автомобіля, а воно вна-

<sup>1</sup> «Дорогою» ми для стислості називаємо дорожнє полотно.



слідок цього штовхає дорогу *назад*. При цьому відповідно до третього закону Ньютона дорога штовхає автомобіль *уперед* (рис. 9.5, б).

Напрямлену вперед силу, що діє на автомобіль або інший транспортний засіб з боку дороги, іноді називають *силою тяги*.

Використовує третій закон Ньютона і весляр: він штовхає воду назад, а вода штовхає весляра разом з човном уперед (рис. 9.6).



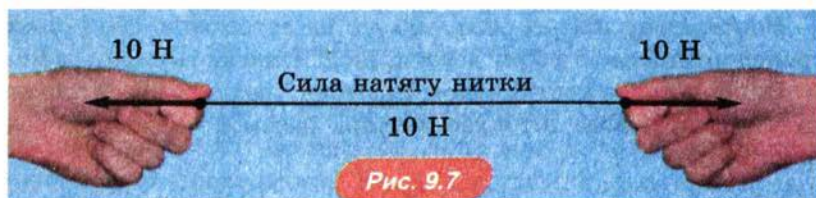
А завдяки чому може змінити свою швидкість тіло, коли до-  
вкола нього нічого немає і тому нема від чого відштовхнутися:

наприклад, якщо це тіло — космічний корабель, що перебуває у відкритому космосі? Відповідь на це запитання знайшов російський вчений і винахідник К. Е. Ціолковський. Про це, а також про внесок українських учених та інженерів в освоєння космосу ми розповімо в § 12. *Імпульс. Закон збереження імпульсу.*

## СИЛА НАТЯГУ НИТКИ АБО ТРОСА

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Нитку тягнуть за кінці в протилежні боки із силами  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (рис. 9.7). Чи рівні ці сили за модулем, якщо масою нитки можна знехтувати? Чому дорівнює сила натягу нитки, якщо  $F_1 = 10$  Н?



**Розв'язання.** Якщо сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  не рівні за модулем, то їх рівнодійна  $\vec{F}$  не дорівнює нулю. Отже, згідно з другим законом Ньютона нитка набуде прискорення  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , де  $m$  — маса нитки.

А тепер звернімо увагу на застереження в умові, виділене курсивом: саме в ньому вся «сіль» задачі! Оскільки масою нитки можна знехтувати, то нитка набула б величезного прискорення, якби рівнодійна  $\vec{F}$  не дорівнювала нулю.

Звідси випливає, що  $\vec{F} = 0$ , тобто протилежно напрямлені сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  рівні за модулем.

Силою натягу нитки в даному разі є сила, прикладена до будь-якого кінця нитки. У цьому випадку сила натягу нитки дорівнює 10 Н.

**Відповідь:** сили рівні за модулем; сила натягу нитки 10 Н.

Поширеними помилками в цій задачі є відповіді 0 і 20 Н. Щоб ці помилки стали очевидними, уявіть, що один кінець нитки прив'язано до кільця, закріпленого в стіні. Якщо тягти цю нитку із силою 10 Н, то очевидно, що сила натягу



нитки дорівнює 10 Н. Але ж відповідно до третього закону Ньютона кільце при цьому «тягне» нитку теж із силою 10 Н!

#### 4. ВАГА І НЕВАГОМІСТЬ

##### ЧОМУ ВАГА ТІЛА У СТАНІ СПОКОЮ ДОРІВНЮЄ СИЛІ ТЯЖІННЯ?

Розглянемо для прикладу сили, що діють на книгу, яка лежить на столі. Це сила тяжіння  $\vec{F}_t = m\vec{g}$  і сила нормальної реакції  $\vec{N}$  (рис. 7.2). Вони врівноважують одна одну, тому

$$\vec{N} = -m\vec{g}.$$

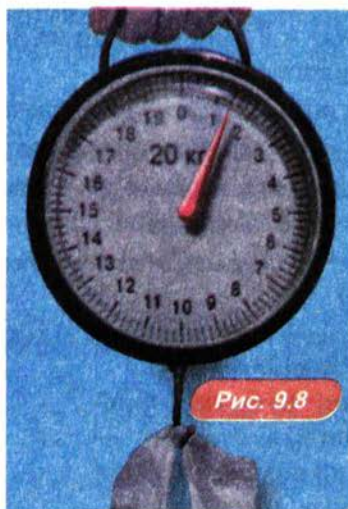
Розглянемо тепер сили, з якими діють одне на одне книга і стіл. Це вага книги  $\vec{P}$  і сила нормальної реакції  $\vec{N}$  (рис. 7.1). Відповідно до третього закону Ньютона

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

З рівнянь  $\vec{P} = -\vec{N}$  і  $\vec{N} = -m\vec{g}$  випливає, що

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Оскільки вага тіла, що перебуває в спокої, дорівнює силі тяжіння, а сила тяжіння пропорційна масі тіла, масу тіла, як ми вже говорили, часто вимірюють *зважуванням* (рис. 9.8).



Вага дорівнює силі тяжіння не тільки для тіла, що перебуває в спокої, а й для тіла, що рухається з постійною (за модулем і напрямом) швидкістю, оскільки й у цьому випадку сила тяжіння і сила нормальної реакції, що діють на тіло, урівноважують одна одну.

Через нерухомий блок перекинута невагому нерозтяжну нитку, до кінців якої підвішено вантажі рівної маси  $m$ . Чому дорівнює сила натягу нитки, якщо тертям у блоці можна знехтувати?

**Розв'язання.** Вантажі однакової маси урівноважаться, тобто вони або перебуватимуть у спокої, або рухатимуться з постійною швидкістю. У такому разі, як ми вже знаємо, вага тіла дорівнює силі тяжіння. А вага — це і є сила, з якою вантаж розтягує підвіс. У даному разі вага кожного вантажу за модулем дорівнює  $mg$ . Отже, сила натягу нитки дорівнює  $mg$ .

**Відповідь:**  $mg$ .

### ВАГА ТІЛА, ЩО РУХАЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ

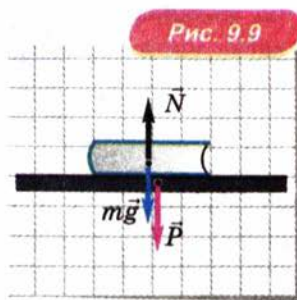
Для того щоб знайти, чому дорівнює вага тіла, що рухається з прискоренням, розглянемо, наприклад, сили, які діють на книжку, що лежить у ліфті, коли цей ліфт рухається з прискоренням  $\vec{a}$ , напрямленим вгору.

На книжку діють дві сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила пружності  $\vec{N}$  з боку ліфта. А з боку книжки на ліфт діє сила пружності  $\vec{P}$  — вага книжки (рис. 9.9).

Але тепер сили  $m\vec{g}$  і  $\vec{N}$  не врівноважують одна одну, бо їх рівнодійна  $m\vec{g} + \vec{N}$  надає книжці прискорення  $\vec{a}$ . Згідно з другим законом Ньютона  $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}$ , а відповідно до третього закону Ньютона  $\vec{N} = -\vec{P}$ . Тому  $m\vec{a} = m\vec{g} - \vec{P}$ . Звідси отримуємо, що вага тіла, яке рухається з прискоренням, виражається формулою  $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ .

Зверніть увагу: вага тіла залежить тільки від прискорення і не залежить від швидкості.

У якому випадку вага тіла більша за силу тяжіння, а в якому — менша? Якщо прискорення тіла напрямлене вгору,  $|\vec{g} - \vec{a}| = g + a$ , тому  $P = m(g + a) > mg$ . Якщо ж прискорення напрямлене вниз (і не більше за модулем, ніж прискорення вільного падіння), то  $|\vec{g} - \vec{a}| = g - a$ , а отже,  $P = m(g - a) < mg$ .





Вантаж масою 100 кг піднімають з напрямленим угору прискоренням, що дорівнює за модулем  $2 \frac{m}{c^2}$ . Якою є

сила натягу троса, яким піднімають вантаж?

**Розв'язання.** Сила натягу тросу — це вага вантажу. Прискорення вантажу напрямлене вгору, тому в цьому випадку  $P = m(g + a) = 100 \cdot (10 + 2) = 1200$  (Н).

**Відповідь:** 1200 Н.

Зверніть увагу: якщо прискорення вантажу напрямлене *вгору*, то сила натягу троса *більша* від сили тяжіння, що діє на вантаж. Згідно з третім законом Ньютона з такою самою за модулем силою вантаж розтягує трос. А сила, з якою вантаж розтягує трос, і є вагою вантажу. Отже, якщо вантаж рухається з прискоренням, напрямленим угору, то вага вантажу

$$P = m(g + a).$$

Якщо ж прискорення тіла напрямлене *вниз* (але не більше за модулем, ніж прискорення вільного падіння), то вага тіла

$$P = m(g - a).$$

З цієї формули випливає, зокрема, що коли тіло рухається з прискоренням, рівним прискоренню вільного падіння, то його вага дорівнює *нулю*. Розглянемо цей випадок докладніше.

### НЕВАГОМІСТЬ

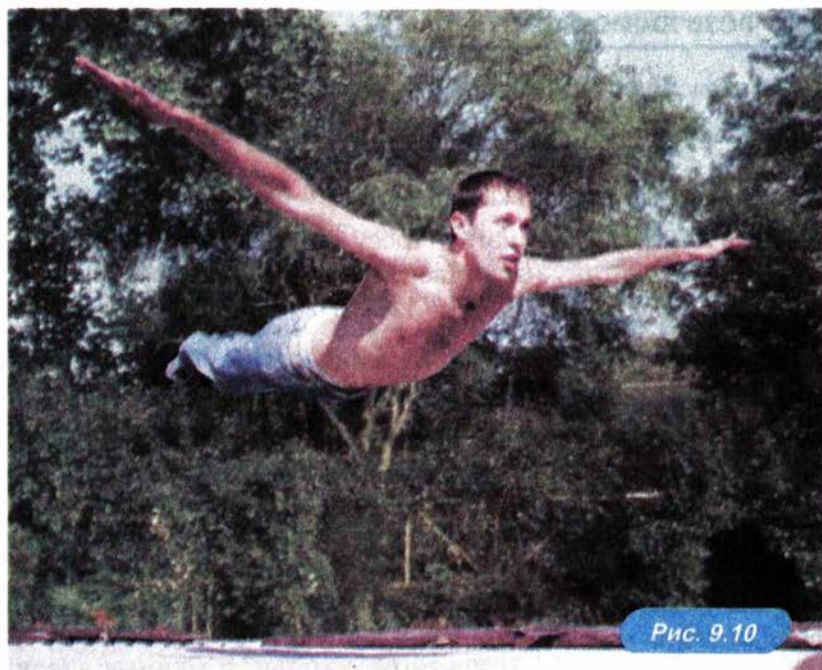
Коли тіло вільно падає, воно не тисне на опору і не розтягує підвіс. А це означає, що *вага тіла, яке вільно падає, дорівнює нулю*.

Стан, у якому вага тіла дорівнює нулю, називають *невагомістю*.

Зверніть увагу: у невагомості вага тіла дорівнює нулю, але сила тяжіння, як і раніше, дорівнює  $m\vec{g}$ .

У невагомості перебувають усі тіла, на які діє *тільки* сила тяжіння (наприклад, космонавти під час польоту з вимкненими двигунами — у цьому випадку космічний корабель і всі тіла, що є в ньому, рухаються тільки під дією сили тяжіння, тобто перебувають у невагомості).





На короткий час ви можете стати невагомим, просто підстрибнувши. З того моменту, коли ваші ноги відірвуться від підлоги, і до того моменту, коли вони торкнуться підлоги знову, ви перебуватимете в невагомості: адже при цьому ви не тиснете на опору і не розтягуєте підвіс. Яскраві враження від відчуття невагомості можна дістати, стрибаючи на батуті<sup>1</sup> (рис. 9.10). Але перебуваючи в невагомості протягом кількох секунд, не можна відчутти невагомості так, як її відчують космонавти, які перебувають у невагомості місяцями.

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Незважаючи на простоту формулювання третій закон Ньютонів так само не очевидний, як і два перших.

Річ у тім, що *рівні за модулем сили*, з якими взаємодіють два тіла, далеко не завжди виявляють себе *однаково помітно*. Розглянемо приклади.

**Падіння каменя.** Коли камінь падає, збільшення його швидкості внаслідок дії сили притягання Землі добре помітне: швидкість каменя за кожну секунду збільшується приблизно на 10 м/с.

<sup>1</sup> Батут — це туго натягнута сітка для стрибків.

На Землю з боку каменя діє така сама за модулем сила притягання. Але внаслідок того, що маса Землі в багато разів більша від маси каменя, помітити зумовлене дією цієї сили прискорення Землі неможливо.

**Удар по м'ячу.** Коли футболіст б'є по м'ячу, м'яч різко змінює швидкість, але швидкість самого футболіста при цьому майже не змінюється. Це пояснюється не тільки тим, що маса футболіста набагато більша від маси м'яча. Важливо ще й те, що на футболіста з боку Землі діє велика сила тертя: саме для того, щоб збільшити її, футболісти і надягають бутси із шипами. Якби футболіст сильно бив по м'ячу, стоячи на льоду в туфлях, він під час удару теж набув би помітної швидкості.

«Неочевидність» простих на перший погляд законів природи (у тому числі трьох законів Ньютона) має глибокий сенс. Щоб у складних та взаємозалежних явищах природи помітити просту закономірність, потрібна проникливість справжнього вченого.

Вивчаючи фізику, ви й сьогодні стикаєтеся з тією ж «дивовижністю» і «неочевидністю» законів природи, що довгий час «заважала» людям побачити ці закономірності й відкрити закони природи.

## 6. МЕЖІ ЗАСТОСОВНОСТІ ЗАКОНІВ НЬЮТОНА

Усі фізичні закони й теорії є *наближенням* до дійсності, оскільки у будь-якій теорії використовується модель явищ і процесів. Тому як закони, так і теорії мають певні *межі застосовності*.

Мають межі застосовності й закони Ньютона. Наприклад, другий закон Ньютона, як ви знаєте, виконується тільки в інерціальних системах відліку.

Засновану на законах Ньютона теорію називають *класичною механікою*. Як показує досвід, класична механіка справедлива для руху тіл зі швидкостями, набагато меншими від швидкості світла. Якщо ж швидкості тіл порівнянні зі швидкістю світла (з такими швидкостями рухаються відносно Землі, наприклад, віддалені галактики та елементарні частинки в прискорювачах), висновки класичної механіки суперечать дослідам і спостереженням. Для тіл, що рухаються зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла, справедлива *спеціальна теорія відносності*, створена видатним фізиком Альбертом Ейнштейном<sup>1</sup> на

<sup>1</sup> Ейнштейн жив і працював у Швейцарії, Німеччині та США.



початку 20-го століття. Основні положення спеціальної теорії відносності ми розглянемо в *Розділі 3. Релятивістська механіка*.

Класичну механіку не можна застосовувати також для опису руху та взаємодії частинок дуже малої маси — наприклад, електронів. Тому в межах класичної механіки не можна зрозуміти, скажімо, особливості будови атома. Для розуміння атомних явищ на початку 20-го століття зусиллями декількох учених різних країн було створено *квантову механіку*. Основні її положення розглядатимуться в курсі фізики 11-го класу.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Третій закон Ньютона: під час будь-якої взаємодії тіла діють одне на одне із силами, що рівні за модулем і протилежні за напрямом:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .
- Властивості сил, з якими тіла взаємодіють одне з одним: вони мають однакову фізичну природу і не врівноважують одна одну, оскільки прикладені до різних тіл.
- Вага тіла, що вільно падає, дорівнює нулю. Стан, у якому вага тіла дорівнює нулю, називають невагомістю.
- Закони Ньютона мають певні межі застосовності.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Які спостереження вказують на те, що тіла, які взаємодіють, впливають одне на одне?
2. Сформулюйте третій закон Ньютона.
3. Чи однакову фізичну природу мають сили, з якими тіла взаємодіють?
4. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил пружності.
5. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил тяжіння.
6. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил тертя.
7. Чи можуть сили, з якими два тіла взаємодіють, урівноважувати одна одну?
8. Чому рівні за модулем сили, з якими два тіла взаємодіють, не завжди виявляють себе однаково помітно? Наведіть приклади, коли дія однієї з цих сил залишається непоміченою.



9. На столі лежить книга. Які сили діють на неї? Чи врівноважують вони одна одну? Чи мають вони однакову фізичну природу? Чи пов'язані ці сили третім законом Ньютона?
10. Мати говорить маленькому синові: «Не тягни собаку за хвіст!» А син відповідає матері: «Я не тягну, а лише тримаю. Він сам тягне!» Хто має рацію з точки зору третього закону Ньютона: мати чи син?
11. Чому на льоду важко розганятися?

### Другий рівень

12. Більярдна куля, рухаючись, стикається з такою ж кулею, що перебуває у стані спокою. Прискорення якої кулі під час удару більше?
13. Доведіть, що вага тіла, яке перебуває у стані спокою, дорівнює силі тяжіння.
14. Чи завжди вага тіла дорівнює силі тяжіння?
15. Чому якісна дорога має бути з твердим покриттям?
16. Що таке невагомість? За якої умови тіло перебуває у невагомості?
17. Кінь зрушує з місця візок. Згідно з третім законом Ньютона кінь і візок діють один на одного з однаковими за модулем і протилежно напрямленими силами. Чому ж тоді кінь з візком рухаються з прискоренням, напрямленим уперед?
18. Два хлоп'ячі гурти змагаються в перетягуванні каната, і один гурт перемагає. Поясніть, як у цьому змаганні може бути переможець, якщо згідно з третім законом Ньютона обидва гурти тягнуть канат з однаковими за модулем силами. Вважайте, що масою каната можна нехтувати.
19. Складіть задачу за темою «Третій закон Ньютона», відповіддю якої було б «Сила натягу троса дорівнює 200 Н».

## § 10. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

1. Закон всесвітнього тяжіння
2. Рух штучних супутників Землі та космічних кораблів
3. Як було відкрито закон всесвітнього тяжіння?
4. Як «зважили» Землю?
5. Як визначити першу космічну швидкість?

### 1. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

Як ви вже знаєте, планети рухаються навколо Сонця тому, що їх притягує Сонце. Якби в якийсь момент сили притягання до Сонця зникли, планети полетіли б у космічний простір, рухаючись за інерцією, тобто прямолінійно і рівномірно (рис. 10.1).

Місяць рухається навколо Землі теж унаслідок притягання до Землі.

У другій половині 17-го століття І. Ньютон здогадався, що притягання космічних тіл одне до одного має ту саму природу, що й сила тяжіння, з якою Земля притягує тіла.

Використавши астрономічні дані та провівши розрахунки, Ньютон сформулював

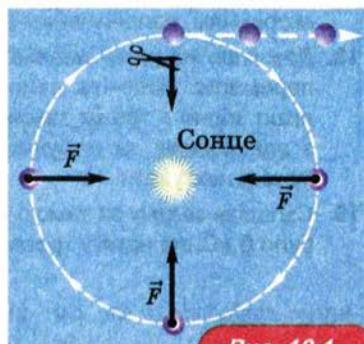


Рис. 10.1

*закон всесвітнього тяжіння:* дві матеріальні точки з масами  $m_1$  і  $m_2$ , що знаходяться на відстані  $R$  одна від одної, притягають одна одну із силами, прямо пропорційними їхнім масам і обернено пропорційними квадрату відстані між ними. Модуль кожної сили:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Ця формула справедлива також для однорідних куль, навіть якщо відстань між їхніми центрами порівнянна з радіусами куль. У такому разі відстанню  $R$  слід вважати відстань між центрами куль.

Коефіцієнт пропорційності  $G$  називають *гравітаційною сталою*. Вимірювання показали, що  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ . Далі ми розповімо, як уперше виміряли гравітаційну сталу (див. нижче «Як «зважили» Землю?»).

**Фізичний зміст гравітаційної сталої.** Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі, з якою одна матеріальна точка масою 1 кг притягує другу таку ж матеріальну точку, що розташована на відстані 1 м від першої. Ця сила дуже мала: вона дорівнює  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$ , що в кілька *мільйонів* разів менше від ваги комара!

Таку силу можна виміряти тільки за допомогою дуже чутливих приладів. От чому в повсякденному житті ми помічаємо притягання тіл тільки до Землі, яка має величезну масу.

## 2. РУХ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ТА КОСМІЧНИХ КОРАБЛІВ

В одній із своїх книг І. Ньютон описує такий уявний експеримент. На дуже високій горі встановили величезну гармату і стріляють з неї в горизонтальному напрямі (рис. 10.2).

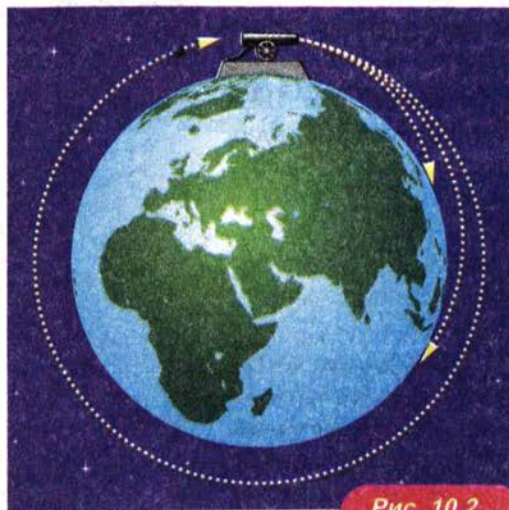


Рис. 10.2

Унаслідок притягання до Землі траєкторія снаряда викривлятиметься. І якщо швидкість снаряда не дуже велика, то він урешті-решт упаде на Землю. Однак що більша початкова швидкість снаряда, то далі він пролетить!



І за певної швидкості снаряд уже не впаде на Землю: він летітиме *вздовж поверхні Землі, рухаючись по колу*. Отже, цей снаряд стане *штучним супутником Землі*!

Мінімальну швидкість, якої треба надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі, називають *першою космічною швидкістю*. Вона дорівнює приблизно 8 км/с.

Нижче ми покажемо, як обчислити значення першої космічної швидкості.

У наші дні уявний експеримент Ньютона став реальністю: у космосі постійно перебувають сотні штучних супутників, а також космічні станції. Супутники зв'язку дозволяють нам бачити сотні телевізійних програм і розмовляти мобільним телефоном з мешканцем будь-якої країни.

Перший штучний супутник Землі було запущено 1957 року в Радянському Союзі, до складу якого входила тоді й Україна. Про освоєння космосу і, зокрема, про участь України в космічних програмах ми розповімо докладніше в § 12. *Імпульс. Закон збереження імпульсу.*

### 3. ЯК БУЛО ВІДКРИТО ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ?

Ньютон розповідав, що ідея про *всесвітнє тяжіння* народилася в нього, коли він ще зовсім молодим (на той час йому було 25 років) сидів у саду та розмірковував над проблемами світобудови. І раптом Ньютон помітив, як упало яблуко.

Яблуко під час падіння рухається з прискоренням, *напрямленим до Землі*, подумав молодий Ньютон. І Місяць, рухаючись навколо Землі по колу, рухається з прискоренням, *теж напрямленим до Землі*.

То, можливо, це *напрявлене до Землі прискорення* для обох тіл — яблука й Місяця — зумовлене тим, що Земля *притягує*



Рис. 10.3

ці тіла? Ці сили притягання можуть мати *ту саму фізичну природу* (рис. 10.3). А можливо, таку ж саму природу має й сила, з якою Сонце притягує планети?

Ця думка захопила Ньютона: він відчув, що наближається до розгадки однієї з найважливіших на той час загадок світобудови.

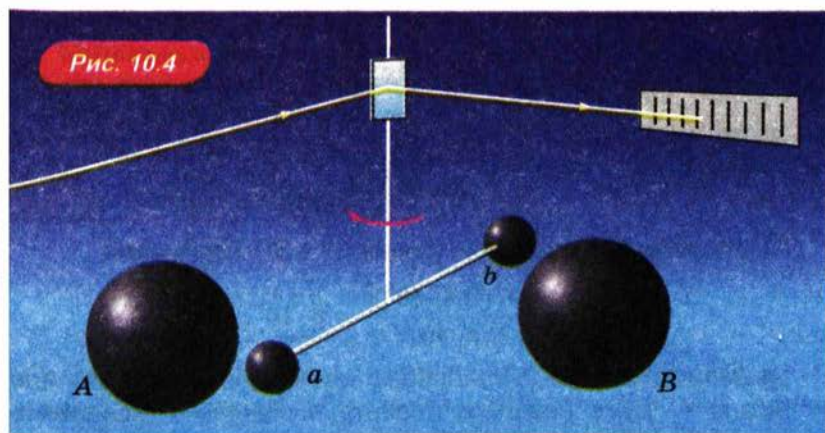
Розробляючи ідею, що його надихнула, Ньютон присвятив їй двадцять років досліджень, створивши при цьому нові розділи математики (диференціальне та інтегральне числення). У результаті він відкрив закон всесвітнього тяжіння і сформулював «три закони Ньютона». Ці відкриття принесли йому славу найвидатнішого вченого.

Однією з підказок, що допомогли Ньютону відкрити закон всесвітнього тяжіння, була закономірність у русі планет, відкрита німецьким астрономом Йоганном Кеплером на початку 17-го століття.

#### 4. ЯК «ЗВАЖИЛИ» ЗЕМЛЮ?

Щоб визначити на досліді значення гравітаційної сталої  $G$ , треба було виміряти силу притягання двох тіл *відомої* маси, що знаходяться на визначеній відстані одне від одного.

Наприкінці 18-го століття це зробив англійський учений Генрі Кавендиш: йому вдалося виміряти надзвичайно малі сили притягання між металевими кулями. На рисунку 10.4 зображено схему досліді Кавендиша.



На тонкій нитці підвішено легкий горизонтальний стержень з невеликими металевими кулями  $a$  та  $b$ . Вони притягаються

до великих металевих куль  $A$  та  $B$ . Силу притягання між кулями можна виміряти за кутом повороту нитки. Щоб виміряти цей кут точніше, Кавендиш прикріпив до нитки маленьке дзеркальце і відзначав переміщення «зайчика».

**Чому дослід Кавендиша назвали «зважуванням Землі»?** Річ у тім, що вимірювання гравітаційної сталої дозволило вперше визначити масу Землі. На той час прискорення вільного падіння  $g$  і радіус Землі  $R_3$  були вже виміряні досить точно. А визначивши з дослідів значення гравітаційної сталої  $G$  і підставивши його у формулу закону всесвітнього тяжіння, можна дізнатися масу Землі. Як це зробити, ми зараз розглянемо.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

**Визначимо масу Землі, використовуючи значення прискорення вільного падіння, гравітаційну сталу та радіус Землі (для наближеного обчислення будемо вважати, що він дорівнює 6400 км).**

**Розв'язання.** Ми вже знаємо, що сила тяжіння  $F_t = mg$ . А оскільки сила тяжіння є проявом сили всесвітнього тяжіння, то можна написати для неї й інший вираз:

$$F_t = G \frac{mM_3}{R_3^2},$$

де  $M_3$  — маса Землі,  $R_3$  — радіус Землі. Порівнюючи вирази для сили тяжіння, маємо

$$mg = G \frac{mM_3}{R_3^2},$$

звідки

$$M_3 = \frac{gR_3^2}{G}.$$

Підставляючи числові дані (виражені в SI), отримаємо

$$M_3 = \frac{10 \cdot (6,4 \cdot 10^6)^2}{6,7 \cdot 10^{-11}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ (кг)}.$$

Це величезна маса (6 трильйонів трильйонів кілограмів). Але Земля — дуже невелика планета порівняно з планетами-гігантами. Маса найбільшої з них (Юпітера) приблизно в 300 разів більша за масу Землі!

**Відповідь:**  $6 \cdot 10^{24}$  кг.



## 5. ЯК ВИЗНАЧИТИ ПЕРШУ КОСМІЧНУ ШВИДКІСТЬ?

Визначимо значення першої космічної швидкості, тобто швидкості штучного супутника Землі на навколоземній орбіті. Так називають орбіту, радіус якої практично дорівнює радіусу Землі  $R_3$ .

На штучний супутник, що рухається навколоземною орбітою, діє сила тяжіння, що дорівнює за модулем  $mg$ , де  $g$  — прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі. Під дією цієї сили супутник рухається з прискоренням, що дорівнює за модулем  $g$ , напрямленим до центра Землі.

З другого боку, ми вже знаємо (див. § 5. *Рівномірний рух по колу*): якщо тіло рухається зі швидкістю  $v$  по колу радіуса  $R$ , то воно рухається з прискоренням  $a = \frac{v^2}{R}$ . Отже,  $\frac{v^2}{R_3} = g$ , звідки

$$v = \sqrt{R_3 g} = 7,9 \text{ км/с.}$$

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Закон всесвітнього тяжіння: дві матеріальні точки масами  $m_1$  і  $m_2$ , що знаходяться на відстані  $R$  одна від одної, притягають одна одну із силами, прямо пропорційними їхнім масам і обернено пропорційними квадрату відстані між ними. Модуль кожної сили  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ . Закон всесвітнього тяжіння відкрив І. Ньютон.
- Коефіцієнт пропорційності  $G$  називають гравітаційною сталою. Вимірювання показали, що  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ . Першим вимірив гравітаційну сталу Г. Кавендиш.
- Мінімальну швидкість, якої слід надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі, називають першою космічною швидкістю. Вона дорівнює приблизно 8 км/с.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

- Як рухалися б планети, якби тяжіння Сонця зникло?
- Як залежать сили тяжіння двох тіл від їхніх мас?
- Дві червоні кулі однакової маси притягаються із силою  $F$ , а дві зелені кулі однакової маси, що знаходяться на такій самій відстані одна від одної, притягаються із силою  $9F$ . У скільки разів маса зеленої кулі більша від маси червоної?
- Як залежить сила тяжіння двох матеріальних точок від відстані між ними?

5. Як зміниться сила тяжіння між двома матеріальними точками, якщо відстань між ними збільшити у 3 рази?
6. Сила тяжіння між двома кулями зменшилася в 36 разів. Як змінилася при цьому відстань між кулями?
7. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння. Хто відкрив цей закон?
8. Чому ми не помічаємо гравітаційного тяжіння між тілами, що нас оточують?
9. Що таке перша космічна швидкість? Чому вона дорівнює?

### Другий рівень

10. Як виміряли гравітаційну сталу? Чому цей дослід назвали «зважуванням Землі»?
11. Порівняйте прискорення вільного падіння на поверхні Землі, Місяця та Сонця. Маса Місяця і Сонця прийміть рівними  $7,3 \cdot 10^{19}$  і  $2 \cdot 10^{27}$  т, а їх радіуси  $1,7 \cdot 10^3$  і  $7 \cdot 10^5$  км.
12. Обчисліть першу космічну швидкість для Місяця.
13. Три кулі 1, 2, 3 однакової маси розташовані вздовж однієї прямої. Де знаходиться куля 3 по відношенню до куль 1 і 2, якщо рівнодійна сил тяжіння, що діють на кулю 3 з боку куль 1 і 2, дорівнює нулю?
14. Центри куль масами 1 і 4 кг знаходяться на відстані 3 м одна від одної. Де треба розмістити третю кулю, щоб рівнодійна сил тяжіння, що діють на неї з боку перших двох, дорівнювала нулю? Чи залежить відповідь від маси третьої кулі?
15. Два супутники рухаються коловими орбітами навколо Землі. Висота орбіти першого супутника більша. Швидкість якого супутника більша?
16. Складіть задачу за темою «Закон всесвітнього тяжіння», відповіддю якої було б «У 100 разів».

## § 11. СИЛИ ТЕРТЯ

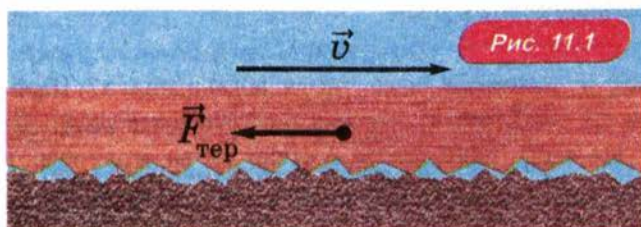
1. Сила тертя ковзання
2. Сила тертя спокою
3. Сила опору під час руху в рідині або газі

### 1. СИЛА ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

Штовхніть книгу, що лежить на столі. Ковзаючи по столу, книга сповільнюватиметься і незабаром зупиниться. Швидкість книги змінювалася тому, що на неї з боку стола діяла *сила тертя ковзання*.

Сили тертя ковзання діють між тілами, що стикаються, коли вони рухаються одне відносно одного. Ці сили напрямлені вздовж поверхні стикання тіл так, щоб зменшити швидкість їхнього відносного руху.

Як ми вже говорили, сили тертя ковзання зумовлені головним чином зачепленням нерівностей тіл, що стикаються. Схематично це зображено на рисунку 11.1. Тому що більш гладкі поверхні тіл, то менші сили тертя між ними. Якщо поверхні настільки гладкі, що силами тертя можна знехтувати, на це вказують зазвичай, використовуючи в умові задачі слово «гладкий»: наприклад, «брусок ковзає по гладкому столу».



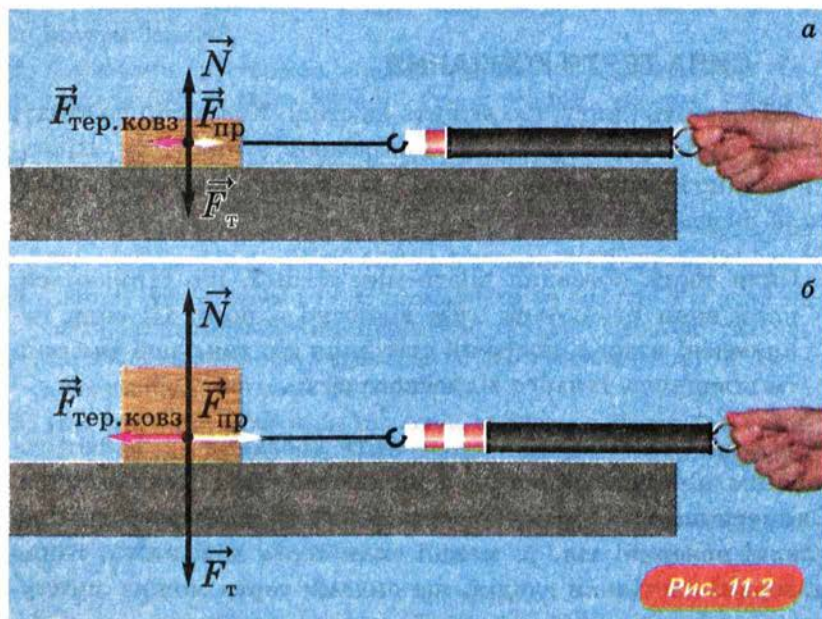
Від чого ж залежить сила тертя ковзання?





## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Щоб виміряти силу тертя ковзання, що діє на брусок з боку стола, тягтимемо предмет по столу так, щоб брусок рухався з постійною швидкістю. При цьому прикладена до бруска сила пружності  $\vec{F}_{\text{пр}}$  врівноважує силу тертя ковзання  $\vec{F}_{\text{тер. ковз}}$ , а це означає, що модулі цих сил рівні. Отже, за показами динамометра можна визначити модуль сили тертя (рис. 11.2, а).



Повторимо цей дослід, поклавши на брусок *такий самий* другий брусок (рис. 11.2, б). Ми побачимо, що сила тертя ковзання збільшилася у 2 рази.

З якої ж причини сила тертя збільшилася? Щоб відповісти на це запитання, подивимося, які ще сили діють на брусок. Це сила тяжіння  $\vec{F}_t$  і рівна їй за модулем, але напрямлена протилежно сила нормальної реакції  $\vec{N}$ . У випадку двох брусків сила тяжіння (а отже, і сила нормальної реакції) збільшилася *теж* у 2 рази. Цей та інші подібні досліди показують, що

модуль сили тертя ковзання  $F_{\text{тер. ковз}}$  пропорційний модулю сили нормальної реакції  $N$ . Тому можна записати:

$$F_{\text{тер. ковз}} = \mu N.$$

Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називають *коефіцієнтом тертя*. Його визначають з досліду.

Звернімо увагу на дві обставини.

По-перше, співвідношення між силою тертя ковзання та силою нормальної реакції *не можна* записувати у векторному вигляді, бо сила нормальної реакції перпендикулярна поверхням тіл, що стикаються, а сила тертя ковзання направлена уздовж цих поверхонь.

По-друге, під час руху по *горизонтальній* поверхні під дією *горизонтальної* сили сила нормальної реакції дорівнює за модулем силі тяжіння:  $N = mg$ , тому в цьому досить поширеному випадку сила тертя ковзання  $F_{\text{тер. ковз}} = \mu mg$ .

Наведемо експериментально визначені значення коефіцієнта тертя для деяких видів поверхонь:

Сталь по льоду	0,015
Сталь по сталі	0,03–0,09
Дерево по дереву	0,2–0,5
Шини по сухому асфальту	0,5–0,7
Шини по мокрому асфальту	0,35–0,45
Шини по гладкому льоду	0,15–0,20

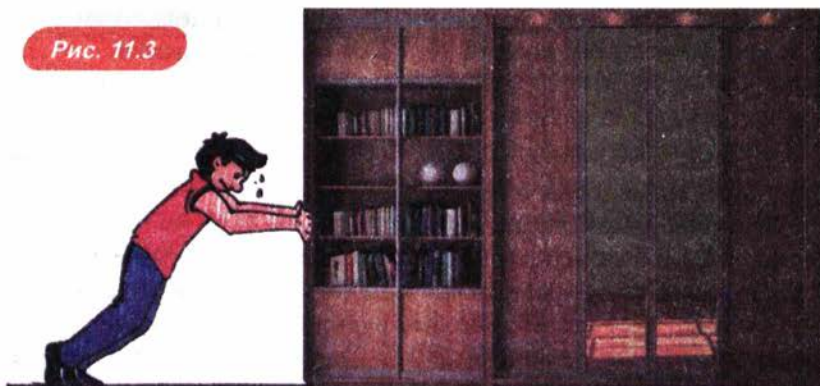
Зверніть увагу, що коефіцієнт тертя шин по мокрому асфальту (а тим більше шин по льоду) у кілька разів менший за коефіцієнт тертя шин по сухому асфальту. Унаслідок цього на мокрому асфальті й на льоду в кілька разів збільшується гальмівний шлях автомобіля (відстань, яку він проїде до повної зупинки). Тому будьте особливо обережні на дорозі під час дощу і тим більше ожеледиці!

## 2. СИЛА ТЕРТЯ СПОКОЮ

Чому так важко зсунути з місця важку шафу (рис. 11.3)? Адже на шафу *у спокої* не може діяти сила тертя ковзання!

Цього разу на шафу з боку підлоги діє *сила тертя спокою*. Відповідно до третього закону Ньютона сила тертя спокою діє і на підлогу з боку шафи. Ці сили діють тільки

Рис. 11.3



доти, доки до шафи прикладено силу, що зсуває її: саме вона й врівноважує силу тертя спокою! Отже,

сили тертя спокою діють між тілами, що стикаються, коли одне з них намагається зсунути відносно іншого. Ці сили напрямлені уздовж поверхні стикання тіл так, щоб перешкоджати їх відносному руху.

Причина виникнення сил тертя спокою та сама, що й сил тертя ковзання: це головним чином зачеплення нерівностей тіл, що стикаються.

**Максимальна сила тертя спокою.** Якщо збільшувати прикладену до шафи силу, ми все-таки зсунемо шафу. Отже, сила тертя спокою не перевищує якогось «граничного» значення, який називають *максимальною силою тертя спокою*. Дослід показує, що максимальна сила тертя спокою приблизно дорівнює силі тертя ковзання.

**Чи може сила тертя спокою надавати руху тілу?** Авжеж, ми зустрічаємося з цим на кожному кроці!

Згадайте: під час обговорення застосування третього закону Ньютона (див. § 9. *Третій закон Ньютона*) ми говорили, що, роблячи крок, людина *відштовхується* від дороги. Але ж при цьому між ногою та дорогою діють саме сили тертя *спокою*! Щоб переконатися в цьому, згадайте, що відбиток підошви на дорозі *чіткий*, а це вказує на те, що підошва, яка відштовхується, перебуває у спокої відносно дороги.

Автомобілі теж розганяє *сила тертя спокою*: на це вказують чіткі відбитки малюнка шин. Коли колеса автомобіля, обертаючись, «штовхають» за допомогою сили тертя спокою



дорожнє полотно назад, з боку дорожнього полотна на колеса автомобіля теж діє сила тертя спокою, але напрямлена вперед. Цю силу, як ми вже говорили, називають силою тяги. Може здатися дивним, що навіть гоночні автомобілі (не реактивні) розганяє сила тертя спокою. Але, як ми з вами переконалися, це *справді так!*

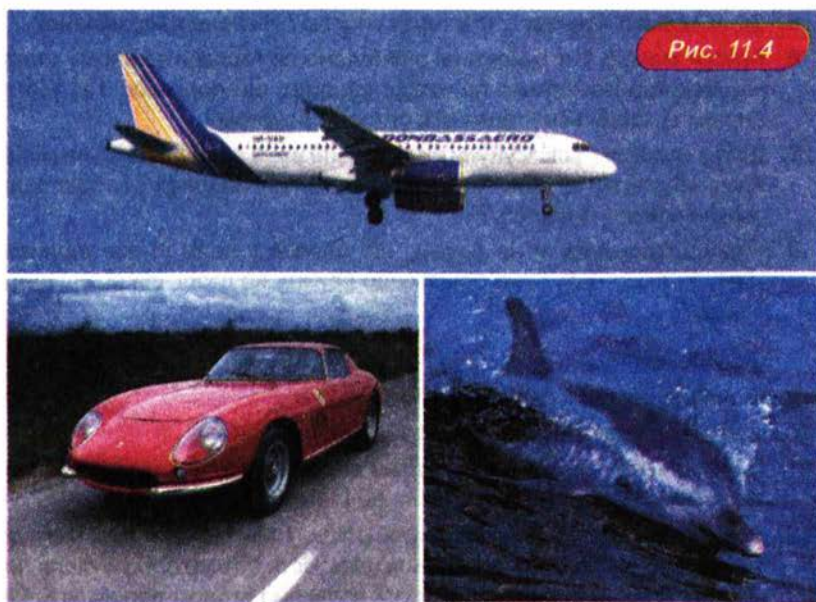
### 3. СИЛА ОПОРУ ПІД ЧАС РУХУ В РІДИНІ АБО ГАЗІ

Коли тіло рухається в рідині або газі (наприклад, у повітрі), на тіло з боку рідини або газу діє *сила опору*.

Так само, як і сила тертя ковзання, вона напрямлена протилежно швидкості тіла. Але між цими силами є й важлива відмінність: сила тертя ковзання майже не залежить від швидкості тіла, а *сила опору зі збільшенням швидкості помітно збільшується*.

Сили ж тертя спокою під час руху в рідині або газі взагалі немає. Переконатися в цьому неважко: навіть дитина, потягнувши за мотузку, може легко зрушити важкий човен, що плаває на воді.

Силу опору руху можна істотно зменшити, якщо надати тілу так званої «обтічної» форми. Це — знайома вам форма літаків, гоночних автомобілів і найшвидкіших мешканців моря, наприклад дельфінів (рис. 11.4).



- Сили тертя ковзання виникають між тілами, що стикаються, коли вони рухаються одне відносно одного. Ці сили напрямлені уздовж поверхні стикання тіл так, щоб зменшити швидкість їхнього відносного руху.
- Модуль сили тертя ковзання  $F_{\text{тер. ковз}}$  пропорційний модулю сили нормальної реакції  $N$ , отже  $F_{\text{тер. ковз}} = \mu N$ . Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називають коефіцієнтом тертя.
- Сили тертя спокою діють між тілами, що стикаються, коли одне з них намагається зрушити відносно іншого. Ці сили напрямлені уздовж поверхні стикання тіл так, щоб перешкоджати їхньому відносному руху. Максимальна сила тертя спокою приблизно дорівнює силі тертя ковзання.

## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. За яких умов виникає сила тертя ковзання? Як вона напрямлена?
2. Яка причина сили тертя ковзання?
3. Як зменшити силу тертя ковзання?
4. Як залежить сила тертя ковзання від сили нормальної реакції?
5. За яких умов виникає сила тертя спокою? Як вона напрямлена?
6. Брусок масою 1 кг рухається рівномірно по горизонтальному столу під дією горизонтально прикладеної сили, що дорівнює 3 Н. Чому дорівнює коефіцієнт тертя між столом і бруском?
7. Шафу намагаються зсунути вправо, але вона залишається на місці. Куди напрямлена сила тертя спокою, що діє на шафу? Чи діє сила тертя спокою на підлогу?
8. Якщо злегка подути на брусок, що плаває у воді, то він попливе. Чому ж, якщо подути на брусок, що лежить на столі, він не зрушить з місця?

### Другий рівень

9. Яка сила розганяє автомобіль?
10. Чому на льоду колеса автомобіля буксують?
11. Оцініть, чому дорівнює гальмівний шлях автомобіля під час ожеледиці, якщо швидкість автомобіля 60 км/год.
12. Брусок, що лежав на столі, штовхнули, і він пройшов по столу до зупинки 50 см. Чому дорівнювала швидкість бруска одразу після штовху, якщо коефіцієнт тертя між бруском і столом дорівнює 0,4?

13. На столі лежить стос із трьох однакових книг масою по 400 г. Яку горизонтальну силу треба прикласти, щоб витягнути середню книгу, притримуючи решту? Коефіцієнт тертя між книгами дорівнює 0,3.
14. Брусок масою 1 кг рівномірно тягнуть по столу за допомогою пружини жорсткістю 100 Н/м. Чому дорівнює коефіцієнт тертя між бруском і столом, якщо видовження пружини дорівнює 3 см?
15. Човен витягують на берег, прикладаючи горизонтально напрямлену силу. Чому чим більше витягнутий з води човен, тим більшу силу треба прикладати?
16. Складіть задачу за темою «Сили тертя», відповіддю якої було б «2 м/с».



## § 12. РУХ І РІВНОВАГА ТІЛА ПІД ДІЄЮ ДЕКІЛЬКОХ СИЛ

1. Рух тіла під дією декількох сил
2. Умови рівноваги тіл

### 1. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ ДЕКІЛЬКОХ СИЛ

#### РУХ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯГИ ТА СИЛИ ОПОРУ

В умовах задач про розгін і гальмування транспорту часто згадують *силу тяги* та *силу опору*.

Що таке сила тяги, ми вже знаємо (див. § 9. *Третій закон Ньютона*). Розв'язуючи задачі, головне — знати, що ця сила напрямлена так само, як швидкість тіла. А під силою опору руху розуміють зазвичай рівнодійну *всіх* сил, напрямлених протилежно швидкості.

#### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

За який час автомобіль проїде 100 м, якщо його початкова швидкість дорівнює нулю, сила тяги 1500 Н, а силу опору можна прийняти рівною 300 Н? Маса автомобіля 1 т.

**Розв'язання.** Для рівноприскореного руху без початкової швидкості час руху  $t$  можна виразити через пройдений шлях  $l$

і прискорення  $a$  за формулою  $l = \frac{at^2}{2}$ . Маємо

$$t = \sqrt{\frac{2l}{a}}.$$

Отже, щоб визначити час руху, треба знати прискорення автомобіля. Воно зумовлене спільною дією сили тяги  $\vec{F}_{\text{тяг}}$  та сили опору  $\vec{F}_{\text{оп}}$ . Оскільки ці сили напрямлені *протилежно*, їх рівнодійна  $\vec{F}$  напрямлена у бік більшої сили (сили тяги) і дорівнює за модулем *різниці* модулів сили тяги і сили опору:  $F = F_{\text{тяг}} - F_{\text{оп}}$ . Тому з рівняння другого закону Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$  отримуємо  $F_{\text{тяг}} - F_{\text{оп}} = ma$ . Звідси

$$a = \frac{F_{\text{тяг}} - F_{\text{оп}}}{m}.$$

Підставивши числові дані в SI, отримаємо  $a = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Підставляючи це значення в наведений вище вираз для часу руху, отримаємо  $t = 13 \text{ с}$ .

**Відповідь:** 13 с.

## РУХ ЗВ'ЯЗАНИХ ТІЛ

У деяких задачах потрібно дослідити рух тіл, зв'язаних нерозтяжною і невагомою ниткою або тросом. Розглянемо приклад.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Два вантажі масами  $m_1$  і  $m_2$  з'єднано нерозтяжною ниткою, перекинутою через нерухомий блок (рис. 12.1), причому  $m_2 > m_1$ . Які прискорення вантажів і сила натягу нитки? Яка вага кожного з вантажів? Будемо вважати, що масами блоку і нитки, а також тертям у блоці можна знехтувати.

**Розв'язання.** На кожний з вантажів діють дві сили: сила тяжіння та сила натягу нитки.

Указівка на те, що масами блоку і нитки, а також тертям у блоці можна знехтувати, означає, що сила натягу нитки по обидва боки від блоку однакова, тобто нитка діє на кожний з вантажів з однією й тією самою силою, яку ми позначимо  $\vec{T}$  (рис. 12.2).

Рівняння другого закону Ньютона для вантажів мають вигляд:

$$m_1 \vec{g} + \vec{T} = m_1 \vec{a}_1,$$

$$m_2 \vec{g} + \vec{T} = m_2 \vec{a}_2.$$

Оскільки нитка нерозтяжна, модулі переміщень, а отже, модулі швидкостей та прискорень вантажів рівні. Урахуємо тепер, що прискорення вантажів напрямлені протилежно, тому  $\vec{a}_1 = -\vec{a}_2$ .

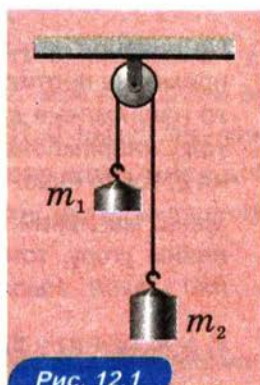


Рис. 12.1

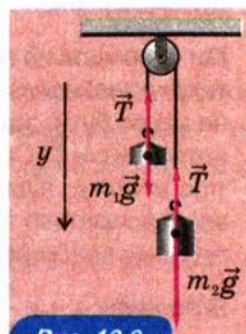


Рис. 12.2

З огляду на це перепишемо рівняння другого закону Ньютона для вантажів у вигляді:

$$m_1 \vec{g} + \vec{T} = -m_1 \vec{a}_2,$$

$$m_2 \vec{g} + \vec{T} = m_2 \vec{a}_2.$$

Віднімаючи від другого рівняння перше, отримуємо  $\vec{g}(m_2 - m_1) = \vec{a}_2(m_2 + m_1)$ . Звідси  $\vec{a}_2 = \vec{g} \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$ . Оскільки

$$\vec{a}_1 = -\vec{a}_2, \text{ одержуємо } \vec{a}_1 = -\vec{g} \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}.$$

За умовою  $m_2 > m_1$ , тому  $\frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} > 0$ . Для проекцій на вісь  $y$  отримуємо

$$a_{1y} = -g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} < 0,$$

$$a_{2y} = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} > 0.$$

Це означає, що прискорення менш масивного вантажу напрямлене протилежно прискоренню вільного падіння  $\vec{g}$ , тобто напрямлене *вгору*. А прискорення більш масивного вантажу напрямлене так само, як і прискорення вільного падіння  $\vec{g}$ , тобто *вниз*.

Менш масивний вантаж рухається з прискоренням, напрямленим угору, тому, як було показано вище (див. § 9. *Третій закон Ньютона*), його вага за модулем дорівнює

$$P_1 = m_1(g + a) = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Більш масивний вантаж рухається з прискоренням, напрямленим *униз*, тому його вага за модулем дорівнює  $P_2 = m_2(g - a) = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ .

Ми одержали на перший погляд дивний результат — вага вантажів *різної маси* виявилась *однаковою*:  $P_1 = P_2$ ! Однак інакше й не могло бути: адже вага кожного вантажу — це *та сама* сила натягу нитки  $\vec{T}$ ! Справді, за означенням, вага — це сила, з якою тіло розтягує підвіс. Те, що вага вантажів різної маси однакова, пояснюється тим, що ці вантажі рухаються з прискоренням, причому прискорення вантажів напрямлені *протилежно*.

**Відповідь:**  $a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}, P_1 = P_2 = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, T = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$



Покажемо на прикладі щойно розглянутої задачі, як проаналізувати *вже отриману* відповідь: по-перше, це дозволить переконатися в її правильності, а по-друге, допоможе наочно уявити відповідь, що сприяє розвитку фізичної інтуїції.

1. Якщо маси вантажів рівні ( $m_1 = m_2 = m$ ), то з формули  $a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$  випливає, що прискорення вантажів дорівнює нулю, тобто вони рухаються рівномірно або перебувають у стані спокою (залежно від початкового стану). При цьому натяг нитки і вага кожного з вантажів дорівнюють  $mg$ .

2. Якщо маса другого вантажу набагато більша від маси першого вантажу ( $m_2 \gg m_1$ ), значенням  $m_1$  у чисельнику і знаменнику виразу для прискорення  $a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$  можна знехтувати порівняно зі значенням  $m_2$ . У результаті отримаємо, що  $a \approx g$ , тобто вантажі рухаються з прискоренням, майже рівним за модулем прискоренню вільного падіння. При цьому прискорення більш масивного вантажу напрямлене вниз, тобто цей вантаж «падає», практично «не помічаючи» менш масивного вантажу.

## 2. УМОВИ РІВНОВАГИ ТІЛ

Знати умови рівноваги тіл дуже важливо для проектування будь-якої споруди, яка має перебувати в спокої (від стільця до залізничного мосту).

### ПЕРША УМОВА РІВНОВАГИ ТІЛА

Якщо тіло перебуває в спокої, його швидкість дорівнює нулю, тобто *залишається незмінною*. Звідси випливає, що *прискорення тіла дорівнює нулю*. А для цього згідно з другим законом Ньютона необхідно, щоб

векторна сума всіх прикладених до тіла сил дорівнювала нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0.$$



## ПОСТАВИМО ДОСЛІДИ

Якщо до тіла, закріпленого на осі, прикладено дві сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які лежать в площині, що перпендикулярна осі обертання, і намагаються обертати тіло в *протилежні* боки, як показано на рисунку 12.3, то, як показує дослід, тіло залишиться в рівновазі, якщо  $F_1 l_1 = F_2 l_2$ , де  $l_1$  і  $l_2$  — відстані від осі обертання до *ліній дії* сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ .

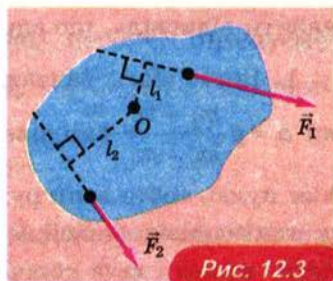


Рис. 12.3

Відстань від осі обертання до *лінії дії* сили<sup>1</sup> називають *плечем сили*.

Отже, тіло, закріплене на осі, перебуває в рівновазі під дією двох сил, якщо добуток модуля сили на її плече для обох сил однаковий. Це — уже знайоме вам із курсу фізики 8-го класу *правило важеля*.

**Момент сили.** Ми бачимо, що обертальна дія сили визначається добутком модуля сили на відстань від осі обертання до *лінії дії* сили.

Добуток модуля сили  $F$  на її плече  $l$  називають *моментом сили* і позначають  $M$ . Отже,  $M = F \cdot l$ .

У SI одиницею моменту сили є ньютон-метр (Н · м).

З використанням поняття моменту сили умову рівноваги тіла можна сформулювати так: тіло, закріплене на осі, перебуває в рівновазі, якщо момент  $M_1$  сили, що намагається обертати тіло в одному напрямі, дорівнює моменту  $M_2$  сили, що намагається обертати його в протилежному напрямі:  $M_1 = M_2$ .

Умову рівноваги тіла, закріпленого на осі, у такому вигляді називають *правилом моментів*.

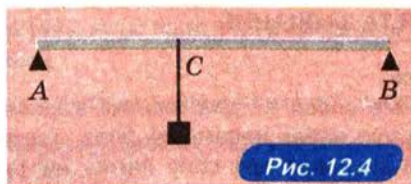
Використовуючи правило моментів, умову рівноваги тіла легко узагальнити на випадок, коли до тіла, закріпленого на осі, прикладено кілька сил:

<sup>1</sup> Вісь обертання перетинає площину, в якій розташовано сили, у деякій точці, тому плече сили буде відстанню від цієї точки до *лінії дії* сили. Нагадаємо, що відстанню від точки до прямої називають довжину перпендикуляра, проведеного з цієї точки до даній прямій.

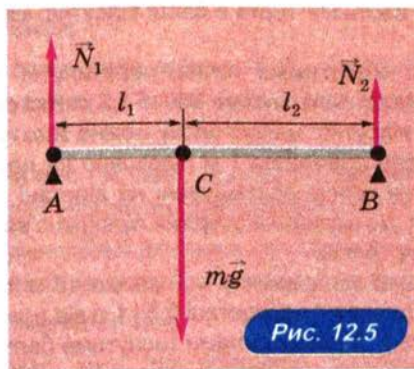
тіло, закріплене на осі, перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, що намагаються обертати тіло в одному напрямі, дорівнює сумі моментів сил, що намагаються обертати його в протилежному напрямі.

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

До горизонтального стержня підвішено вантаж масою 50 кг (рис. 12.4). Якими є сили тиску стержня на опори, якщо  $AC = 40$  см,  $BC = 60$  см? Масою стержня можна знехтувати.



**Розв'язання.** Стержень перебуває в рівновазі, отже,  $m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 = 0$  (рис. 12.5). Оскільки сили  $\vec{N}_1$  та  $\vec{N}_2$  напрямлені вгору, а сила  $m\vec{g}$  напрямлена вниз, то з наведеного векторного рівняння отримуємо таке рівняння для модулів сил:  $N_1 + N_2 = mg$ . Застосуємо правило моментів, вважаючи, що вісь обертання проходить через точку C. Тоді правило моментів набуває вигляду  $N_1 l_1 = N_2 l_2$ . З рівнянь  $N_1 + N_2 = mg$  та  $N_1 l_1 = N_2 l_2$  отримуємо  $N_1 = mg l_2 / (l_1 + l_2)$ ,  $N_2 = mg l_1 / (l_1 + l_2)$ . Підставляючи числові дані, знаходимо  $N_1 = 300$  Н,  $N_2 = 200$  Н.



**Відповідь:**  $N_1 = 300$  Н,  $N_2 = 200$  Н.



- Щоб тіло перебувало в рівновазі, необхідно, щоб *векторна сума всіх прикладених до тіла сил дорівнювала нулю*:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0$ .
- Плечем сили  $l$  називають відстань від осі обертання до лінії дії сили.
- Моментом сили  $M$  називають добуток модуля сили  $F$  на її плече  $l$ .
- Тіло, закріплене на осі, перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, що намагаються обертати тіло в одному напрямі, дорівнює сумі моментів сил, що намагаються обертати його в протилежному напрямі.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

- В умові задачі є слова «...два вантажі з'єднані невагомою ниткою, перекинутою через невагомий блок. Тертям можна знехтувати...». Який висновок про силу натягу нитки можна зробити?
- В умові задачі є слова «...два вантажі з'єднані нерозтяжною ниткою...». Як пов'язані між собою прискорення вантажів?
- Що називають плечем сили?
- Що називають моментом сили?
- У чому полягає умова рівноваги для тіла, закріпленого на осі?

#### Другий рівень

- Мотоцикл масою 400 кг рушає з місця з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ . Яка сила тяги, якщо коефіцієнт опору руху<sup>1</sup> дорівнює 0,03?
- Вантажівка масою 25 т, рушаючи з місця, розвиває силу тяги 32,5 кН. Через який час її швидкість дорівнюватиме 54 км/год, якщо коефіцієнт опору руху дорівнює 0,08?
- До невагомої нерозтяжної нитки, перекинутої через нерухомий блок, підвішено вантажі масами 100 і 400 г. З якими прискореннями рухаються вантажі? Тертя в блоці відсутнє, масою блока можна знехтувати.
- До невагомої нерозтяжної нитки, перекинутої через нерухомий блок, підвішено вантажі масами 800 г і 1,2 кг. Яка сила натягу нитки? Тертя в блоці відсутнє, масою блоку можна знехтувати.
- Легкий стержень довжиною 1 м підвішено на двох тросах так, що точки кріплення тросів розташовані на відстані 10 см і 20 см від кінців стержня. До середини стержня підвішено вантаж масою 21 кг. Які сили натягу тросів?
- Однорідна балка завдовжки 4 м і масою 40 кг спирається на дві опори, які розташовані на відстані 0,5 і 1 м від правого і лівого кінців балки відповідно. З якими силами тиснутиме балка на кожну опору, якщо на її середину покласти ще вантаж масою 50 кг?

<sup>1</sup> Коефіцієнт опору  $\mu$  дозволяє визначати за формулою  $F = \mu N$  повну силу опору руху.

- Швидкість тіла змінюється тільки внаслідок дії на нього інших тіл.
- Якщо дві сили врівноважують одна одну, то вони рівні за модулем і напрямлені протилежно.
- Перший закон Ньютона: існують системи відліку, що називають інерціальними, у яких тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.
- Сила — векторна величина, що є мірою дії одного тіла на інше.
- Усі механічні явища зумовлені дією трьох видів сил: сил пружності, сил тяжіння та сил тертя.
- Будь-яку силу прикладено до одного тіла з боку іншого тіла. Кожна сила характеризується: 1) модулем; 2) напрямом; 3) точкою прикладання.
- Вагою тіла називають силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс. Вага тіла у спокої дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.
- Вага тіла, що вільно падає, дорівнює нулю. Стан, у якому вага тіла дорівнює нулю, називають невагомістю.
- Силу, з якою опора тисне на тіло, називають силою нормальної реакції. Вона напрямлена перпендикулярно поверхні опори.
- Сила пружності виникає під час деформації тіла, тобто зміни його форми або розмірів.
- Закон Гука: модуль сили пружності  $F_{\text{пр}}$  прямо пропорційний видовженню пружини  $x$ . Закон Гука можна записати у вигляді:  $F_{\text{пр}} = k |x|$ .
- Силу, що діє на тіло так само, як декілька одночасно прикладених до цього тіла сил, називають рівнодійною цих сил.
- Знаходження рівнодійної декількох сил називають додаванням цих сил. Сили додають за правилом додавання векторів.
- Маса є мірою інертності тіла.
- Відношення мас двох тіл обернено пропорційне відношенню прискорень цих тіл під час їх взаємодії:  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ .

- Другий закон Ньютона: рівнодійна всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .
- Силу, з якою Земля притягує тіло, називають силою тяжіння. Сила тяжіння є проявом сил всесвітнього тяжіння.
- Сила тяжіння  $\vec{F}_t = m\vec{g}$ , де  $m$  — маса тіла. Завдяки тому, що сила тяжіння пропорційна масі тіла, масу можна вимірювати зважуванням.
- Швидкість тіла може бути напрямлена під будь-яким кутом до сили, що діє на тіло. Якщо швидкість тіла напрямлена так само, як сила, тіло рухається прямолінійно і його швидкість збільшується; якщо швидкість напрямлена протилежно силі, тіло рухається прямолінійно і його швидкість зменшується; якщо швидкість напрямлена під кутом до сили, тіло рухається криволінійно.
- Третій закон Ньютона: під час будь-якої взаємодії тіла діють одне на одне із силами, рівними за модулем і протилежними за напрямом:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .
- Властивості сил, з якими тіла взаємодіють одне з одним: вони завжди мають однакову фізичну природу і не врівноважують одна одну, оскільки прикладені до різних тіл.
- Закон всесвітнього тяжіння: дві матеріальні точки з масами  $m_1$  і  $m_2$ , що знаходяться на відстані  $R$  одна від одної, притягають одна одну із силами, прямо пропорційними їхнім масам та обернено пропорційними квадрату відстані між ними. Модуль кожної сили  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ . Закон всесвітнього тяжіння відкрив І. Ньютон.
- Коефіцієнт пропорційності  $G$  називають гравітаційною сталою. Вимірювання показали, що  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ . Першим виміряв гравітаційну сталу Кавендиш.
- Мінімальну швидкість, якої треба надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі, називають першою космічною швидкістю. Вона дорівнює приблизно 8 км/с.
- Сили тертя ковзання виникають між тілами, що стикаються, коли вони рухаються одне відносно одного. Ці сили напрямлені уздовж поверхні стикання тіл так, щоб зменшити швидкість відносного руху тіл.
- Модуль сили тертя ковзання  $F_{\text{тер. ковз}}$  пропорційний модулю сили нормальної реакції  $N$ , тому  $F_{\text{тер. ковз}} = \mu N$ . Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називають коефіцієнтом тертя.



- Сили тертя спокою діють між тілами, що стикаються, коли одне з них намагається зрушити відносно іншого. Ці сили напрямлені вздовж поверхні стикання тіл так, щоб перешкоджати їхньому відносному руху.
- Щоб тіло перебувало в рівновазі, необхідно, щоб векторна сума всіх прикладених до тіла сил дорівнювала нулю:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0$ .
- Щоб тіло, закріплене на нерухомій осі, перебувало в рівновазі, необхідно, щоб сума моментів сил, що намагаються обертати тіло в одному напрямі, дорівнювала сумі моментів сил, що намагаються обертати його в протилежному напрямі.

## § 13. ІМПУЛЬС.

### ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

1. Імпульс
2. Закон збереження імпульсу
3. Реактивний рух
4. Непружне зіткнення рухомих тіл

#### 1. ІМПУЛЬС

У цьому параграфі ми ознайомимося з фізичною величиною, що *зберігається* (тобто не змінюється) під час взаємодії тіл. Завдяки цьому в деяких випадках ми зможемо передбачити результат взаємодії тіл, не розглядаючи сили, з якими тіла діють одне на одне (наприклад, під час зіткнення).

Спробуємо знайти величину, що зберігається, у досліді.



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Візьмемо два однакові візки, що можуть катитися по столу практично без тертя. Спочатку один візок перебуває у спокої, а інший наїжджає на нього, як зображено на рисунку 13.1, *а*. Зіткнувшись, візки зчіплюються і рухаються потім як *одне тіло*. Таке зіткнення називають *непружним зіткненням* (або *непружним ударом*).

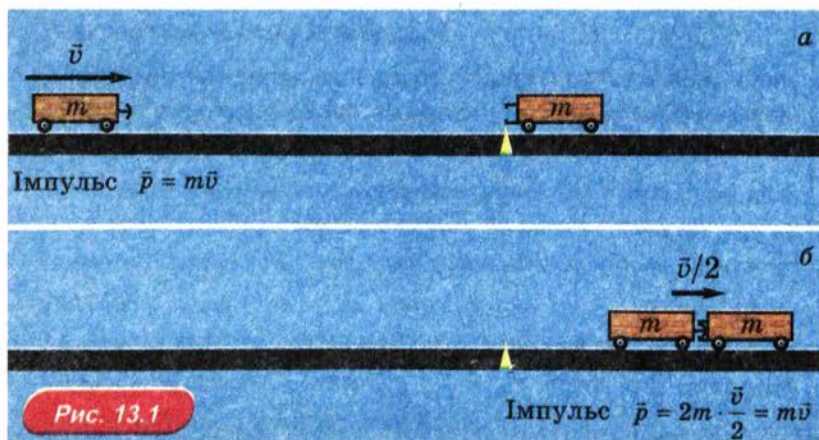


Рис. 13.1

$$\text{Імпульс } \vec{p} = 2m \cdot \frac{\vec{v}}{2} = m\vec{v}$$

Вимірювання показують, що швидкість двох зчеплених візків *удвічі менша*, ніж початкова швидкість одного візка (рис. 13.1, б).

Щоб побачити в нашому досліді фізичну величину, яка зберігається, звернемо увагу на те, що маса двох *візків удвічі* більша за масу одного візка. А оскільки швидкість двох зчеплених візків *удвічі менша* від початкової швидкості одного візка, то це означає, що не змінився *добуток маси на швидкість*.

Фізичну величину  $\vec{p}$ , що дорівнює добутку маси тіла  $m$  на його швидкість  $\vec{v}$ , називають *імпульсом тіла* (або просто *імпульсом*):

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Імпульс — величина *векторна*. Модуль імпульсу  $p = mv$ , а напрям імпульсу збігається з напрямом швидкості тіла. Одиниця імпульсу в SI —  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$  (кілограм-метр на секунду).

У нашому досліді зберігається *сумарний* імпульс візків. Спочатку імпульс мав тільки візок, який рухався: його початковий імпульс  $\vec{p}_{\text{поч}} = m\vec{v}$ , де  $m$  — маса візка,  $\vec{v}$  — його початкова швидкість. Після зіткнення обидва візки рухаються зі швидкістю  $\vec{v}/2$  як одне тіло масою  $2m$ . Імпульс цього тіла (тобто кінцевий сумарний імпульс)  $\vec{p}_{\text{кін}} = 2m \cdot \frac{\vec{v}}{2} = m\vec{v}$ . Отже, кінцевий *сумарний* імпульс візків дійсно дорівнює початковому.

Сумарний імпульс взаємодіючих тіл зберігається не завжди. Далі ми розглянемо, за яких умов він зберігається.

## 2. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

Розглянемо систему тіл, що взаємодіють *тільки* одне з одним і не взаємодіють з іншими тілами. Таку систему тіл називають *замкнутою*.

Систему взаємодіючих тіл можна приблизно вважати замкнутою й тоді, коли дії інших тіл компенсують одна одну або нехтувано малі.

Наприклад, розглянуті вище два візки приблизно можна вважати замкнутою системою тіл, адже сила тяжіння та сила нормальної реакції стола, що діють на кожний візок, урівноважують одна одну, а сила тертя нехтувано мала. Тому головною причиною зміни швидкостей візків є взаємодія між самими візками.



Досліди, подібні описаному вище, показують, що

*векторна сума імпульсів тіл, що складають замкнуту систему, не змінюється. Це — закон збереження імпульсу.*

Можна показати, що закон збереження імпульсу є наслідком законів Ньютона.

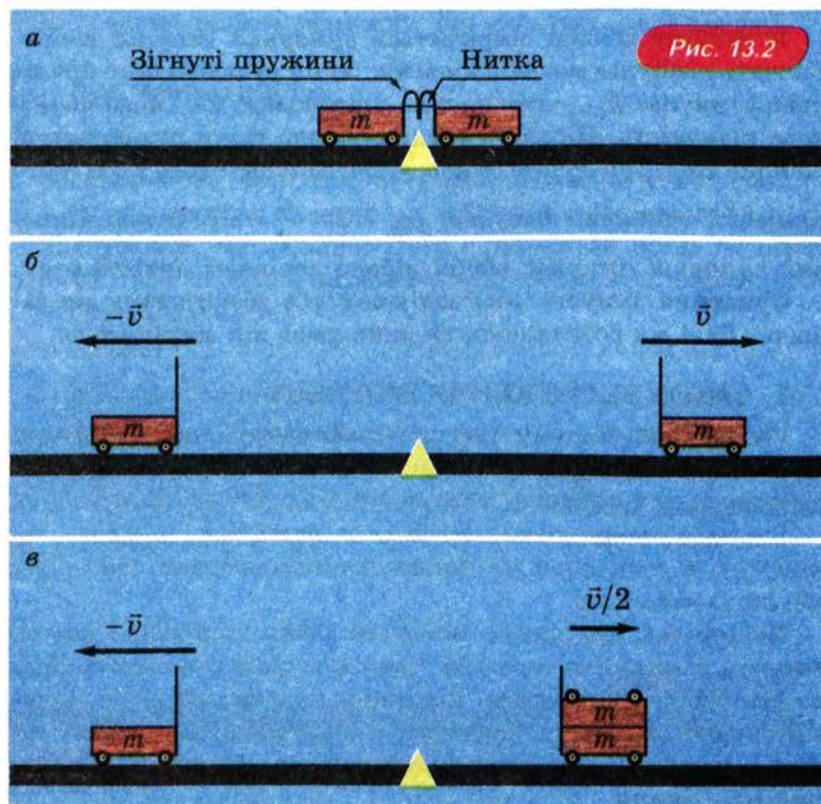
Продемонструємо закон збереження імпульсу ще на декількох дослідах.



### ПОСТАВИМО ДОСЛІДИ

На двох однакових візках закріпимо пружини, зігнемо їх і зафіксуємо в зігнутому стані за допомогою нитки (рис. 13.2, а). Поставимо візки поруч і перепалимо нитку. Пружини, розпрямившись, розштовхнуть візки.

Вимірювання показують, що візки рівної маси набувають при цьому однакових за модулем і протилежно напрямлених швидкостей (рис. 13.2, б). Отже, після взаємодії імпульси візків  $\vec{p}_1$



і  $\vec{p}_2$  також рівні за модулем і напрямлені протилежно:  $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$ . Таким чином, векторна сума імпульсів візків після взаємодії дорівнює нулю:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0.$$

Але вона дорівнювала нулю і до взаємодії, тому що візки перебували у спокої. Отже, у цьому досліді закон збереження імпульсу виконується.

Повторимо дослід, поклавши на один з візків *такий самий* візок. Вимірювання показують, що в цьому випадку навантажений візок, що має *удвічі більшу* масу, набуває *удвічі меншої* швидкості, ніж порожній (рис. 13.2, в). Таким чином, і в цьому випадку імпульси двох тіл після взаємодії напрямлені протилежно і рівні за модулем. Отже, і в цьому досліді виконується закон збереження імпульсу:

векторна сума імпульсів тіл після взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів до взаємодії (у даному разі — дорівнює нулю).

Закон збереження імпульсу дозволяє знайти кінцеві швидкості тіл після непружного зіткнення. Розглянемо приклад.

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Людина масою 60 кг стрибає з розбігу у візок масою 30 кг, що стоїть на рейках. Швидкість людини в момент стрибка напрямлена горизонтально, і її модуль дорівнює  $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . З якою швидкістю їхатиме візок з людиною? Уважатимемо, що тертя між візком і рейками можна знехтувати.

**Дано:**

$$m_1 = 60 \text{ кг}$$

$$m_2 = 30 \text{ кг}$$

$$v_1 = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v - ?$$

**Розв'язання**

Відповідно до закону збереження імпульсу

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v.$$

$$\text{Звідси } v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[v] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Підставимо числові значення й отримаємо:

$$v = \frac{60 \cdot 6}{60 + 30} = 4 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

**Відповідь:**  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### 3. РЕАКТИВНИЙ РУХ

Ви вже знаєте, що швидкість тіла може змінюватися тільки внаслідок дії на це тіло *інших* тіл. Наприклад, бігун розганяється, відштовхуючись від дороги, а відповідно до третього закону Ньютона дорога штовхає бігуна вперед.

А від чого ж відштовхується ракета, розганяючись у відкритому космосі?

Від того, що вона взяла із собою в політ! Із сопла ракети з величезною швидкістю вилітають продукти згоряння палива (розжарені гази), одержуючи імпульс, напрямлений *назад*. При цьому відповідно до закону збереження імпульсу сама ракета одержує імпульс, напрямлений *уперед*. Це схематично зображено на рисунку 13.3, а, де  $\vec{p}_p$  і  $\vec{p}_r$  — імпульси ракети і газів.



Рис. 13.3



У головній частині ракети розташовано кабінку космонавтів та прилади (рис. 13.3, б). На початку польоту на цю частину ракети припадає усього кілька відсотків від загальної маси. Основна ж маса ракети на початку її польоту припадає на паливо.

Рух тіла, що виникає внаслідок відділення його частини зі швидкістю відносно тіла, називають *реактивним рухом*.

Отже, рух ракети — це приклад реактивного руху.

Ідею про те, що ракети можна використовувати для освоєння космосу, висловили російський учений та винахідник Костянтин Едуардович Ціолковський і наш співвітчизник Микола Іванович Кибальчич<sup>1</sup>.

Великий внесок у теорію освоєння космосу зробив також наш співвітчизник Юрій Васильович Кондратюк<sup>2</sup>. Незалежно від Ціолковського він винайшов основне рівняння руху ракети, навів схему й опис багатоступінчастої ракети. Найвідомішим досягненням Кондратюка є розрахунок оптимальної траєкторії польоту до інших планет («траса Кондратюка»). Цю ідею було реалізовано в польотах на Місяць серії американських космічних кораблів «Аполлон».

Запуск першого штучного супутника Землі було здійснено в 1957 році під керівництвом С. П. Корольова, який народився в Житомирі й навчався в Київському політехнічному інституті. Першим космонавтом світу був громадянин СРСР Юрій Гагарін. У той час Україна входила до складу СРСР. Серед космонавтів, життя яких пов'язане з Україною, — Олексій Леонов, Павло Попович, Георгій Шонін та десятки інших. Першим космонавтом незалежної України став Леонід Каденюк.

Сьогодні за допомогою ракет на навколоземні орбіти виводять великі космічні станції, на яких постійно працюють космонавти. Запущено дослідницькі ракети на Венеру, Марс

<sup>1</sup> М. І. Кибальчич народився в Чернігівській губернії в 1851 році. Він став на шлях революційної діяльності і був засуджений до страти. У в'язниці Кибальчич продовжував роботу над проектом створення ракетного літального апарата.

<sup>2</sup> Справжнє ім'я, по батькові та прізвище — Олександр Гнатович Шаргей. Під час громадянської війни 1918–1920 рр. йому, щоб урятувати життя, довелося змінити ім'я.

та інші планети Сонячної системи. Україна бере активну участь у багатьох міжнародних космічних проектах. Найбільш значним серед них є «Морський старт». У цьому проекті також беруть участь США, Росія, Норвегія. Для цього проекту Україна створила ракету «Зеніт» — одну з найдосконаліших у світі на сьогоднішній день.

Реактивними двигунами обладнують також літаки: найшвидші літаки — саме з реактивними двигунами. «Автомобільні» рекорди швидкості теж було поставлено на автомобілях з реактивними двигунами.

Реактивний рух використовується й у природі: наприклад, кальмар рухається завдяки тому, що викидає струмінь води.

#### 4. НЕПРУЖНЕ ЗІТКНЕННЯ РУХОМИХ ТІЛ

Досі ми розглядали випадки непружного зіткнення двох тіл, коли одне чи обидва тіла до взаємодії перебували у спокої. Розглянемо тепер випадки, коли до зіткнення *обидва* тіла *рухаються* уздовж однієї прямої, напрямленої вздовж осі  $x$ .

Позначимо маси тіл  $m_1$  і  $m_2$ , а їх швидкості — відповідно  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$ . Після зіткнення тіла рухаються як одне тіло масою  $m_1 + m_2$ . Позначимо швидкість цього тіла  $\vec{v}$ . Із закону збереження імпульсу випливає, що  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$ .

Звідси

$$\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

У проєкціях на вісь  $x$  це рівняння набуває вигляду

$$v_x = \frac{m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}.$$

Розглянемо конкретні приклади.

#### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Візок масою 30 кг, що рухається зі швидкістю  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , наздоганяє інший візок масою 20 кг, що рухається зі швидкістю  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Візки зчіпляються. Чому дорівнює швидкість візків після зчіплення?

**Дано:**

$$m_1 = 30 \text{ кг}$$

$$v_1 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_2 = 20 \text{ кг}$$

$$v_2 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$v = ?$

**Розв'язання**

Із закону збереження імпульсу випливає, що

$$v_x = \frac{m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}.$$

Нехай до зіткнення візки рухалися в додатному напрямі осі  $x$ . Тоді обидві проекції імпульсів тіл додатні. Отже, отримуємо

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[v] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Підставимо числові значення:

$$v = \frac{30 \cdot 1 + 20 \cdot 0,5}{30 + 20} = 0,8 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

**Відповідь:** 0,8 м/с.

Далі розглянемо випадок, коли тіла до зіткнення рухаються *назустріч* одне одному. Тоді в чисельнику формули

$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$  стоїть сума *протилежно* напрямлених векторних величин.

Ця сума — теж векторна величина. Її напрям збігається з напрямом доданка з більшим модулем. Отже, швидкість тіла, утвореного внаслідок непружного зіткнення, напрямлена так само, як і швидкість того тіла, що до зіткнення мало більший за модулем імпульс.

Щоб визначити модуль суми протилежно напрямлених векторних величин, їх модулі *віднімають* (див. § 1. *Механічний рух. Система відліку*). Розглянемо приклад.

**?**

### РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Два візки їдуть *назустріч* один одному. Маса червоного візка 20 кг, а маса зеленого 30 кг. Швидкості візків дорівнюють відповідно  $1$  і  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Візки зчіпляються. Як напрямлена швидкість візків після зчіплення — убік руху червоного чи зеленого візка? Чому дорівнює ця швидкість?



**Дано:**

$$m_1 = 20 \text{ кг}$$

$$v_1 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_2 = 30 \text{ кг}$$

$$v_2 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v = ?$$

**Розв'язання**

Передусім знайдемо напрям швидкості візків після зчіплення. Модуль імпульсу червоного візка  $m_1 v_1 = 20 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ,

а модуль імпульсу зеленого візка

$$m_2 v_2 = 30 \text{ кг} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 15 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Імпульс червоного візка до зіткнення більший, ніж імпульс зеленого. Тому після зчіплення візки рухатимуться в напрямі руху червоного візка. Отже, доцільно вибрати так само додатний напрям осі  $x$ .

Із закону збереження імпульсу випливає, що

$$v_x = \frac{m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}.$$

У нашому випадку  $v_{2x} < 0$ , тому

$$v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[v] = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Підставимо числові значення:

$$v = \frac{20 \cdot 1 - 30 \cdot 0,5}{30 + 20} = 0,1 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

**Відповідь:**  $0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Імпульсом  $\vec{p}$  тіла називають фізичну величину, що дорівнює добутку маси тіла  $m$  на його швидкість  $\vec{v}$ . Імпульс — величина векторна.
- Замкнутою системою називають систему тіл, що взаємодіють тільки одне з одним і не взаємодіють з іншими тілами.
- Закон збереження імпульсу: векторна сума імпульсів тіл, що складають замкнуту систему, не змінюється, тобто векторна сума ім-

пульсів тіл після взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів до взаємодії.

- Реактивним рухом називають рух тіла, який виникає внаслідок того, що від тіла відокремлюється його частина зі швидкістю відносно тіла. Прикладом реактивного руху є рух ракети.
- Використовувати ракети для освоєння космосу запропонували К. Е. Ціолковський та М. І. Кибальчич. Великий внесок в освоєння космічного простору зробив Ю. В. Кондратюк: його ім'ям названо розраховану ним траєкторію польоту до інших планет.
- Перший штучний супутник Землі було запущено в 1957 році під керівництвом С. П. Корольова. Першим космонавтом незалежної України став Леонід Каденюк.

## **? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

### **Перший рівень**

1. Що називають імпульсом тіла? Яка це фізична величина — скалярна чи векторна?
2. Перше тіло масою 3 кг рухається зі швидкістю 1 м/с, а друге тіло масою 1 кг рухається зі швидкістю 3 м/с у протилежному напрямі. Чи однакові імпульси цих тіл?
3. По шосе їдуть вантажівка і легковий автомобіль. Маса вантажівки у 3 рази більша від маси легкового автомобіля, а швидкість легкового автомобіля у 2 рази більша від швидкості вантажівки. У якого тіла модуль імпульсу більший — вантажівки чи легкового автомобіля? У скільки разів?
4. Який імпульс вантажівки масою 20 т при швидкості руху 54 км/год?
5. Сформулюйте закон збереження імпульсу.
6. Чому внаслідок пострілу гармати виникає віддача (гармата відкочується назад)?
7. Завдяки чому розганяється ракета у відкритому космосі?
8. Який рух називають реактивним? Наведіть приклад реактивного руху.
9. Хто запропонував використовувати ракети для космічних польотів?
10. Де і коли було запущено перший штучний супутник Землі?
11. Яку взаємодію тіл називають непружним зіткненням (непружним ударом)?
12. Візок масою 2 кг рухається зі швидкістю 3 м/с, наїжджає на візок масою 1 кг, що перебуває у стані спокою, і зіплюється з ним. Яка швидкість візків після зчеплення?

## Другий рівень

13. Закріплена на візку гармата стріляє в горизонтальному напрямі. Швидкість ядра  $300 \text{ м/с}$ . Яка швидкість візка після пострілу, якщо маса візка з гарматою  $500 \text{ кг}$ , а маса ядра  $5 \text{ кг}$ ?
14. Порожній вагон масою  $20 \text{ т}$  наїжджає на навантажений вагон масою  $60 \text{ т}$ , що перебуває у спокої, і зчіплюється з ним. Після зчеплення вагони рухаються зі швидкістю  $1 \text{ м/с}$ . Яка початкова швидкість порожнього вагона?
15. Візок масою  $20 \text{ кг}$  рухається зі швидкістю  $1 \text{ м/с}$ . Він наздоганяє візок, що рухається зі швидкістю  $0,5 \text{ м/с}$ , і зчіплюється з ним, після чого візки рухаються зі швидкістю  $0,7 \text{ м/с}$ . Яка маса другого візка?
16. Білий та синій візки рухаються назустріч один одному з однаковими за модулем швидкостями. Маса білого візка у  $3$  рази більша від маси синього візка. Унаслідок зіткнення візки зчіплюються і рухаються зі швидкістю  $0,5 \text{ м/с}$ . Якою була за модулем початкова швидкість візків?
17. Складіть задачу за темою «Імпульс. Закон збереження імпульсу», відповідь якої була б «маса другого візка  $25 \text{ кг}$ ».



## § 14. МЕХАНІЧНА РОБОТА. ПОТУЖНІСТЬ

1. Механічна робота
2. Яку роботу треба виконати, щоб розігнати тіло?
3. Робота різних сил
4. Потужність
5. Коли робота дорівнює нулю?
6. Робота декількох сил

### 1. МЕХАНІЧНА РОБОТА

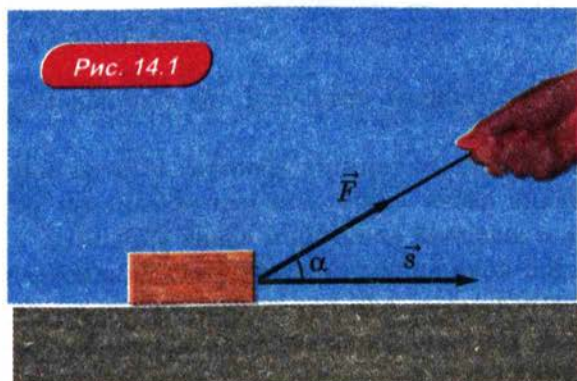
На початку 19-го століття уже працювали верстати на заводах і фабриках, залізницями гуркотіли перші паровози, а моря та річки борознили перші пароплави. Усім їм надавали руху *двигуни*.

У двигунах точка прикладання сили *переміщується в напрямі дії сили*. Наприклад, коли підйомний кран піднімає вантаж, кран прикладає до вантажу силу, точка прикладання якої піднімається разом з вантажем.

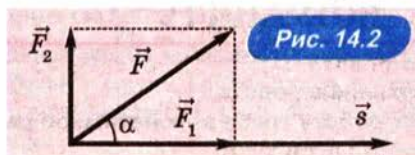
Французький учений В. Понселе запропонував уважати мірою дії двигуна *добуток модуля сили на модуль переміщення точки прикладання сили*. Цю величину вчений назвав *механічною роботою*.

Механічну роботу позначають літерою  $A$  і часто називають просто роботою.

Нехай сила напрямлена під кутом  $\alpha$  до переміщення тіла (рис. 14.1).



Тоді роботу виконує тільки та складова сили  $\vec{F}_1$ , яка напрямлена вздовж переміщення:  $A = F_1 \cdot s = F \cdot s \cdot \cos \alpha$  (рис. 14.2).



Отже, у загальному випадку

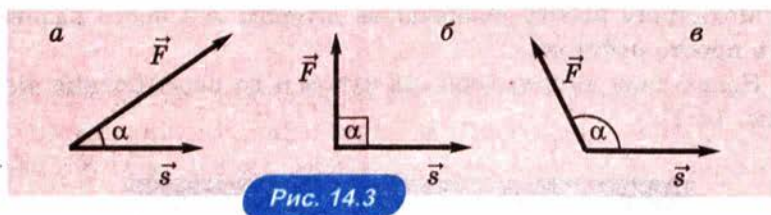
робота сили дорівнює добутку модуля сили на модуль переміщення та на косинус кута між напрямом сили і напрямом переміщення:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

Відзначимо, що робота є *скалярною* величиною.

**Знак роботи.** З формули для роботи випливає, що робота може бути додатною, від'ємною або дорівнювати нулю залежно від того, який кут утворює напрям сили з напрямом переміщення.

- Якщо  $\alpha < 90^\circ$ , то  $A > 0$  (рис. 14.3, а).
- Якщо  $\alpha = 90^\circ$ , то  $A = 0$  (рис. 14.3, б).
- Якщо  $\alpha > 90^\circ$ , то  $A < 0$  (рис. 14.3, в).



Нижче ми розглянемо приклади, що відповідають кожному з цих випадків.

Значення фізичного терміна «робота» істотно відрізняється від значення слова «робота» в «життєвому» розумінні, де «робота» є зазвичай синонімом слова «праця».

Наприклад, коли ви розмірковуєте над складною задачею, ви працюєте розумово, але *механічної* роботи ви при цьому не виконуєте. Не виконує механічної роботи й людина, яка тримає важкий вантаж.

За одиницю роботи прийняли роботу, яку виконує сила 1 Н при переміщенні точки її прикладання на 1 м у напрямі дії сили. Одиницю роботи назвали<sup>1</sup> джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Чи є великою робота 1 Дж? Щоб мати уявлення про одиницю роботи, розглянемо життєвий приклад.

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Яку роботу треба виконати, щоб рівномірно підняти повне відро води на 1 м? Масу відра з водою прийміть рівною 10 кг.

**Розв'язання.** Щоб рівномірно піднімати відро, до нього треба прикладати силу  $F$ , що дорівнює за модулем силі тяжіння  $mg$ . Отже, для піднімання відра на висоту  $h$  треба виконати роботу  $A = Fh = mgh$ . Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:  $A = 10 \cdot 10 \cdot 1 = 100$  (Дж).

**Відповідь:** 100 Дж.

Отже, за «людськими мірками» 1 Дж — невелика робота. У сучасній техніці використовують також кратні одиниці роботи: кілоджоуль ( $1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}$ ) і навіть мегаджоуль ( $1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$ ).

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

З греблі Дніпрогесу (рис. 14.4) щосекунди падає в середньому приблизно  $2000 \text{ м}^3$  води з висоти близько 40 м. Оцініть, яку роботу виконує протягом 1 с сила тяжіння, що діє на воду, яка падає.

**Розв'язання.** Для тіла масою  $m$ , що падає з висоти  $h$ , сила тяжіння  $mg$  виконує роботу  $A = mgh$ . Маса води  $m = \rho V$ , де  $\rho$  — густина води ( $1000 \text{ кг/м}^3$ ),  $V$  — об'єм води, що падає протягом 1 с. Отже,  $A = \rho Vgh$ . Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:

$$A = 1000 \cdot 2000 \cdot 10 \cdot 40 = 800 \cdot 10^6 \text{ (Дж)} = 800 \text{ (МДж)}.$$

**Відповідь:** 800 МДж.

<sup>1</sup> На честь англійського фізика Дж. Джоуля.





## 2. ЯКУ РОБОТУ ТРЕБА ВИКОНАТИ, ЩОБ РОЗІГНАТИ ТІЛО?

Визначимо роботу, яку треба виконати, щоб розігнати тіло масою  $m$ , яке перебувало у спокої, до швидкості, модуль якої дорівнює  $v$ .

Нехай на тіло діє постійна сила  $\vec{F}$ . Тоді тіло рухається рівноприскорено, а робота сили  $A = Fs$ , де  $s$  — модуль переміщення.

Відповідно до другого закону Ньютона  $F = ma$ , де  $a$  — модуль прискорення тіла. Під час рівноприскореного руху без початкової швидкості  $s = \frac{v^2}{2a}$  (див. § 4. *Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху*). Отже,  $A = Fs = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}$ .

Запам'ятаємо отриманий результат: він знадобиться нам у наступному параграфі.

## 3. РОБОТА РІЗНИХ СИЛ

### РОБОТА СИЛИ ТЯЖІННЯ

1. Коли тіло рухається *вниз*, напрям сили тяжіння *збігається* з напрямом переміщення. Тому під час руху тіла *вниз* робота сили тяжіння *додатна*. Якщо тіло масою  $m$  опускається з висоти  $h$ , то робота сили тяжіння

$$A = mgh.$$

2. Коли тіло рухається *вгору*, сила тяжіння напрямлена *протилежно* переміщенню. Тому під час руху тіла вгору робота сили тяжіння *від'ємна*. Під час піднімання тіла масою  $m$  на висоту  $h$  робота сили тяжіння

$$A = -mgh.$$

### РОБОТА СИЛИ ПРУЖНОСТІ

1. Коли деформація пружини *зменшується*, сила пружності, що діє з боку пружини, напрямлена так само, як і переміщення, тому робота сили пружності пружини *додатна*.

Позначимо модуль початкової деформації пружини  $x$ . Відповідно до закону Гука (див. § 7. *Взаємодії та сили*) під час зменшення деформації пружини до нуля модуль сили пружності зменшується від  $kx$  до нуля, тому середнє значення сили пружності  $F_{\text{пр с}} = \frac{kx}{2}$ . Під час зменшення деформації пружини сила пружності виконає роботу

$$A = F_{\text{пр с}} \cdot x = \frac{kx}{2} \cdot x = \frac{kx^2}{2}.$$

Цей вираз теж стане нам у пригоді в наступному параграфі.

2. Коли ми *збільшуємо* деформацію пружини, сила, що діє з боку пружини, напрямлена *протилежно* деформації. Отже, робота сили пружності пружини при цьому *від'ємна*.

### РОБОТА СИЛИ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

Сила тертя ковзання напрямлена *протилежно* швидкості, а отже, і переміщенню тіла. Тому *робота сили тертя ковзання від'ємна*.

## 4. ПОТУЖНІСТЬ

Для характеристики двигуна важлива не тільки робота, а й «швидкість» виконання роботи.

Наприклад, підйомний кран піднімає платформу із сотнями цеглин на висоту багатоповерхового будинку за 1—2 хв. А людині для того, щоб підняти ці самі цеглини на таку саму висоту, знадобилося б кілька днів. Говорять, що потужність підйомного крана в багато разів більша від потужності людини.

*Потужністю  $N$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню виконаної роботи  $A$  до проміжку часу  $t$ , за який цю роботу виконано:*

$$N = \frac{A}{t}.$$

Одиниця потужності — *ват* (Вт) названа на честь англійського винахідника Джеймса Ватта. 1 Вт — це така потужність, за якої робота в 1 Дж виконується за 1 с:

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Часто використовують і кратні одиниці потужності: кіловат (1 кВт =  $10^3$  Вт) і мегават (1 МВт =  $10^6$  Вт).

Щоб мати наочне уявлення про одиницю потужності, розглянемо приклад.

## **? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ**

**Людина піднімає за 1 с повне відро води масою 10 кг на висоту 1 м. Яку потужність вона при цьому розвиває? Рух відра вважайте рівномірним.**

**Розв'язання.** Робота  $A = mgh$ , де  $m$  — маса відра,  $h$  — висота підйому. Отже,  $N = \frac{A}{t} = \frac{mgh}{t}$ , де  $t$  — час підйому. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримуємо:  $A = \frac{10 \cdot 10 \cdot 1}{1} = 100 \text{ (Вт)}.$

**Відповідь:** 100 Вт.

На цьому прикладі ми бачимо, що людина може розвивати потужність у *сотні ват*. Порівняємо потужність людини з потужністю створених нею двигунів:

Транспортний засіб	Потужність двигуна, кВт
Моторолер	4–7
Легковий автомобіль	50–150
Вантажний автомобіль	100–1000
Тепловоз	2000–5000
Літак	3000–100 000
Космічна ракета	більше 100 000 000

Уявіть собі: потужність двигуна космічної ракети перевищує потужність людини в *мільярд разів*!

**Потужність, сила та швидкість.** Потужність, яку розвиває транспортний засіб, часто виражають через силу та швид-



кість. Якщо напрям сили тяги збігається з напрямом переміщення, то потужність, яку розвиває двигун,

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = F \frac{s}{t} = Fv.$$

Отже, *потужність дорівнює добутку модуля сили на модуль швидкості.*

Формула  $N = Fv$  пояснює, чому водій перемикає автомобіль на «першу швидкість», коли рухається вгору. Щоб збільшити силу тяги за тієї самої *потужності* мотора, треба зменшити *швидкість* руху.

## 5. КОЛИ РОБОТА ДОРІВНЮЄ НУЛЮ? ПЕРЕМІЩЕННЯ ДОРІВНЮЄ НУЛЮ

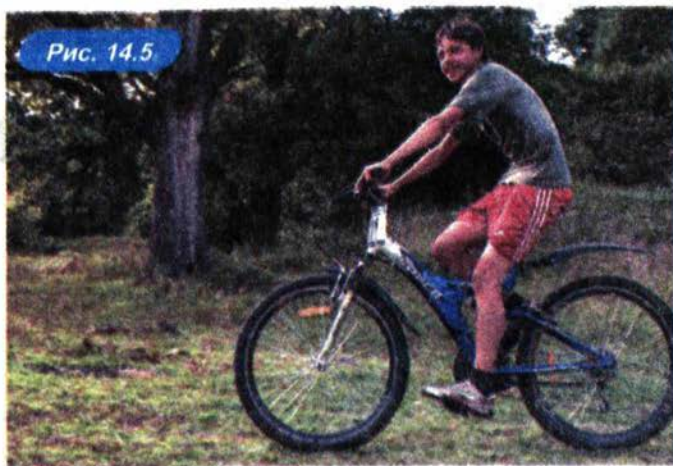
З формули  $A = Fs$  випливає: якщо переміщення дорівнює нулю, то робота дорівнює нулю *незалежно від того, наскільки великою є сила.*

Наприклад, коли людина тримає важкий вантаж, то вона не виконує механічної роботи. Чому ж людина при цьому втомлюється?

Утома викликана напругою м'язів. Якщо покласти той самий вантаж на підлогу, то підлога триматиме його скільки завгодно, «не знаючи втоми».

## СИЛА ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА ПЕРЕМІЩЕННЮ

Нагадаємо: якщо *сила перпендикулярна до переміщення*, робота сили дорівнює нулю. Наприклад, дорівнює нулю робота сили тяжіння, коли тіло рухається по горизонталі (рис. 14.5).



## 6. РОБОТА ДЕКІЛЬКОХ СИЛ

Якщо на тіло, що рухається, діє декілька сил, то кожна з них може виконувати роботу — як додатну, так і від'ємну. Розглянемо це на прикладах.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧІ

1. Вантаж масою 100 кг рівномірно піднімають на висоту 10 м за допомогою троса. Які сили діють при цьому на вантаж? Чому дорівнює робота кожної з цих сил?

**Розв'язання.** На вантаж діють сила тяжіння  $\vec{F}_T$  та сила пружності  $\vec{F}_{\text{пр}}$ . Оскільки вантаж рухається рівномірно, ці сили врівноважують одна одну, тобто рівні за модулем і протилежні за напрямом. Кожна з них дорівнює за модулем  $mg$ , де  $m$  — маса вантажу. Під час підйому вантажу на висоту  $h$  сила пружності виконує додатну роботу  $A_{\text{пр}} = mgh$ , а сила тяжіння — від'ємну роботу  $A_T = -mgh$ . Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо

$$A_{\text{пр}} = 100 \cdot 10 \cdot 10 = 10^4 \text{ (Дж)}, A_T = -100 \cdot 10 \cdot 10 = -10^4 \text{ (Дж.)}$$

**Відповідь:**  $10^4$  Дж;  $-10^4$  Дж.

2. Брусок тягнуть по столу за допомогою горизонтально напруженої нитки. Які сили діють при цьому на брусок? Чому дорівнює робота кожної сили? Маса бруска 2 кг, пройдена ним відстань 1 м, а коефіцієнт тертя між бруском і столом 0,5. Брусок рухається рівномірно.

**Розв'язання.** На брусок діють сила тяжіння  $\vec{F}_T$ , сила нормальної реакції  $\vec{N}$  з боку столу, сила тертя ковзання  $\vec{F}_{\text{тер}}$  та сила пружнос-

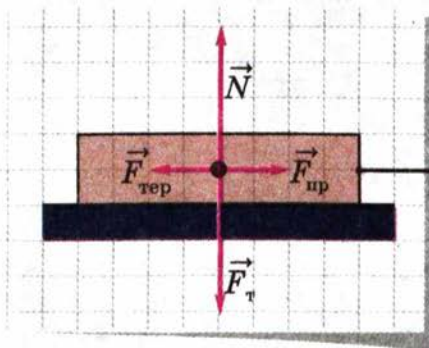


Рис. 14.6

ті  $\vec{F}_{\text{пр}}$  з боку нитки (рис. 14.6). Брусок рухається рівномірно, тому сила нормальної реакції врівноважує силу тяжіння, а сила тертя — силу пружності з боку нитки. Звідси

$$N = mg, \quad F_{\text{пр}} = F_{\text{тер}} = \mu N = \mu mg.$$

Під час горизонтального руху бруска робота сили тяжіння і робота сили нормальної реакції дорівнюють нулю, адже ці сили напрямлені перпендикулярно до переміщення бруска.

Робота сили пружності додатна:

$$A_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} s = \mu mgs,$$

де  $s$  — переміщення бруска, а робота сили тертя від'ємна:

$$A_{\text{тер}} = -F_{\text{тер}} s = -\mu mgs.$$

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримуємо:

$$A_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 1 = 10 \text{ (Дж)},$$

$$A_{\text{т}} = -0,5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 1 = -10 \text{ (Дж.)}$$

**Відповідь:** робота сили пружності дорівнює 10 Дж; робота сили тертя дорівнює -10 Дж; робота сили тяжіння та сили нормальної реакції дорівнює нулю.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Робота сили  $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ , де  $F$  — модуль сили,  $s$  — модуль переміщення,  $\alpha$  — кут між напрямками сили і переміщення.
- Робота — скалярна фізична величина.
- Одиниця роботи — джоуль (Дж); 1 Дж = 1 Н·м.
- Щоб розігнати тіло, що перебувало у спокої, треба виконати роботу  $A = \frac{mv^2}{2}$ , де  $m$  — маса тіла,  $v$  — модуль кінцевої швидкості тіла.
- Робота сили тяжіння під час руху тіла вниз:  $A = mgh$ , де  $m$  — маса тіла,  $h$  — початкова висота тіла.
- Робота сили пружності внаслідок зменшення деформації пружини до нуля:  $A = \frac{kx^2}{2}$ , де  $k$  — жорсткість пружини,  $x$  — початкова деформація пружини.
- Робота сили тертя ковзання від'ємна.



- Потужністю  $N$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню виконаної роботи  $A$  до проміжку часу  $t$ , за який цю роботу виконано:  $N = \frac{A}{t}$ .
- Одиниця потужності — ват (Вт):  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .
- Потужність транспортного засобу можна виразити через силу тяги та швидкість:  $N = Fv$ .



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Напишіть вираз для роботи сили, коли напрям сили збігається з напрямом переміщення.
2. Напишіть вираз для роботи сили, коли сила напрямлена під кутом до переміщення.
3. Чому дорівнює робота сили тяжіння під час руху тіла вгору? вниз?
4. Угору чи вниз напрямлене переміщення тіла, якщо робота сили тяжіння додатна?
5. Наведіть приклад, коли робота сили пружності від'ємна.
6. У яких випадках механічна робота дорівнює нулю? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
7. Підйомний кран рівномірно піднімає бетонний блок масою  $1 \text{ т}$  на висоту  $20 \text{ м}$ . Яку роботу виконує при цьому підйомний кран?
8. Чи можуть дві сили, що діють на рухоме тіло, здійснювати одна — додатну роботу, а друга — від'ємну? Наведіть приклад, що ілюструє вашу відповідь.
9. Що таке потужність?
10. Ліфт за  $1$  хвилину рівномірно піднімає людину масою  $80 \text{ кг}$  на висоту  $36 \text{ м}$ . Яка потужність ліфта?
11. Автомобіль їде з постійною швидкістю  $20 \text{ м/с}$ , при цьому двигун розвиває потужність  $100 \text{ кВт}$ . Яка сила тяги автомобіля?
12. Яку роботу треба виконати, щоб розігнати тіло масою  $1 \text{ кг}$ , яке перебуває в спокої, до швидкості  $10 \text{ м/с}$ ?
13. Яку роботу виконує сила тяжіння під час падіння тіла масою  $2 \text{ кг}$  з висоти  $20 \text{ м}$ ? під час підйому цього ж тіла на висоту  $20 \text{ м}$ ?

### Другий рівень

14. Під час рівномірного підйому платформи з вантажем кран виконав роботу  $1000 \text{ Дж}$ , а під час рівномірного спуску порожньої платформи сила тяжіння виконала роботу  $200 \text{ Дж}$ . У скільки разів маса вантажу більша від маси порожньої платформи?

15. Який знак роботи сили пружності під час стискування недеформованої пружини? під час розтягування?
16. Яку роботу виконує сила пружності, коли пружина жорсткістю  $100 \text{ Н/м}$  повертається в недеформований стан? Початкова деформація пружини  $10 \text{ см}$ .
17. Щоб розтягнути пружину на  $5 \text{ см}$ , треба виконати роботу  $20 \text{ Дж}$ . Яку роботу треба виконати, щоб розтягнути цю саму пружину ще на  $5 \text{ см}$ ?
18. Який знак роботи сили тертя ковзання? Обґрунтуйте вашу відповідь.
19. Школяр масою  $60 \text{ кг}$  піднімається з першого на п'ятий поверх за  $2 \text{ хв}$ . Яку потужність при цьому він розвиває? Висота одного поверху  $3 \text{ м}$ .
20. Ескалатор метро за  $2 \text{ хв}$  піднімає  $200$  пасажирів на висоту  $30 \text{ м}$ . Яка потужність двигуна ескалатора? Прийміть масу одного пасажирів рівною  $70 \text{ кг}$ .
21. Складіть задачу за темою «Механічна робота», відповіддю якої було б « $1,2 \text{ кДж}$ ».

## § 15. ЕНЕРГІЯ

---

1. Механічна енергія
2. Коли механічна енергія зберігається?
3. Приклад розв'язування задачі
4. Закон збереження енергії

### 1. МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ

Досі ми говорили про роботу *сили*. Але будь-яка сила діє з боку якогось *тіла*, тому роботу сили часто називають *роботою тіла*, з боку якого діє ця сила.

Наприклад, коли говорять про роботу, яку виконує здеформована пружина внаслідок зменшення деформації, то мають на увазі роботу, яку виконує сила пружності, що діє з боку пружини.

Тіло, що рухається, теж може виконати роботу. Наприклад, якщо візок, що рухається по столу, наїжджає на пружину і деформує її, то роботу зі стискання пружини виконує сила, що діє з боку візка. При цьому швидкість візка зменшується.

### ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ

Підняте над Землею тіло виконує роботу, коли воно рухається вниз. Згадайте, наприклад, яку велику роботу виконує піднята греблею вода, падаючи на лопаті турбін гідроелектростанції. При цьому змінюється взаємне положення тіла і Землі, що діють *одне на одного*.

Коли роботу виконує здеформована пружина, змінюється взаємне положення частинок, з яких складається пружина, що діють *одна на одну*.

Фізичну величину, що характеризує здатність системи взаємодіючих тіл (частин тіла) виконати роботу внаслідок зміни їхнього взаємного положення, називають *потенціальною енергією*.

Розглянемо приклади.

**Потенціальна енергія піднятого вантажу.** У попередньому параграфі ми показали, що коли вантаж масою  $m$  опускається



з висоти  $h$ , сила тяжіння виконує роботу  $A = mgh$ . Отже, якщо нульове значення потенціальної енергії порівняти з положенням вантажу на поверхні Землі, то

потенціальна енергія піднятого вантажу  $E_p = mgh$ .

**Потенціальна енергія здеформованої пружини.** У попередньому параграфі ми показали, що коли деформація пружини зменшується від початкового значення  $x$  до нуля, сила пружності виконує роботу  $A = \frac{kx^2}{2}$ , де  $k$  — жорсткість пружини. Отже,

потенціальна енергія здеформованої пружини

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

### КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ

Як ми вже говорили, тіло, що рухається, може виконати роботу під час зменшення швидкості.

Фізичну величину, що дорівнює роботі, яку виконує тіло, що рухається, під час зменшення його швидкості до повної зупинки, називають *кінетичною енергією* тіла.

Кінетична енергія тіла масою  $m$ , що рухається зі швидкістю  $v$ , дорівнює роботі, яку треба виконати, щоб надати тілу даної швидкості. У попередньому параграфі ми показали, що вона дорівнює  $\frac{mv^2}{2}$ . Отже,

кінетична енергія

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

де  $m$  — маса тіла,  $v$  — модуль швидкості тіла.

### МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ

Під час падіння тіла його швидкість збільшується. Оскільки кінетична енергія тіла  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , то під час падіння тіла його кінетична енергія також збільшується.

Але в результаті падіння тіла зменшується його висота над поверхнею Землі. Оскільки потенціальна енергія тіла  $E_p = mgh$ , то під час падіння тіла його потенціальна енергія зменшується.

На цьому прикладі ми бачимо, що потенціальна енергія може перетворюватися в кінетичну. Можливе й зворотнє перетворення: коли кинуте вгору тіло піднімається, його кінетична енергія перетворюється в потенціальну.

Отже, у механічних явищах потенціальна енергія може перетворюватися в кінетичну і навпаки. Тому

суму потенціальної та кінетичної енергій тіла називають *механічною енергією*.

**Одиниця енергії.** Зміна енергії тіла або системи взаємодіючих тіл чисельно дорівнює виконаній ними роботі. Тому одиниця енергії збігається з одиницею роботи, тобто *одиницею енергії є джоуль (Дж)*.

## 2. КОЛИ МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ ЗБЕРІГАЄТЬСЯ?

Як ми бачили, під час падіння тіла його кінетична енергія збільшується, а потенціальна — зменшується. Доведемо, що під час *вільного* падіння *сума* цих енергій залишається *постійною*.

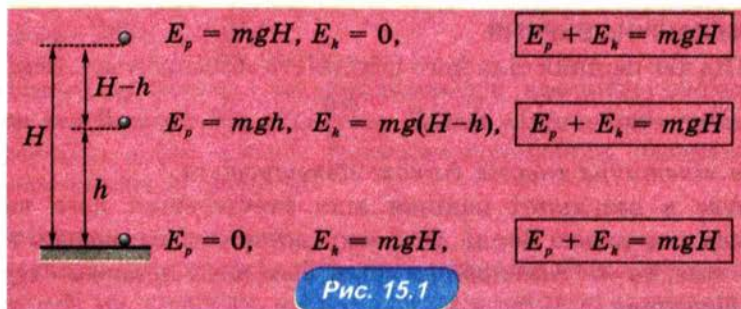
Нехай тіло масою  $m$  падає з висоти  $H$  (рис. 15.1).

Початкова потенціальна енергія тіла дорівнює  $mgH$ , а початкова кінетична енергія дорівнює нулю. Отже, повна початкова механічна енергія тіла (що дорівнює сумі потенціальної та кінетичної енергій)  $E_{\text{поч}} = mgH$ .

Знайдемо кінетичну та потенціальну енергії падаючого тіла через проміжок часу  $t$ .

Під час вільного падіння швидкість  $v = gt$ , тому кінетична енергія

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}.$$



За час  $t$  тіло пролетіло шлях, що дорівнює  $\frac{gt^2}{2}$ , тому потенціальна енергія тіла тепер дорівнює

$$E_p = mg \left( H - \frac{gt^2}{2} \right) = mgH - \frac{mg^2t^2}{2}.$$

Отже, у момент часу  $t$  механічна енергія

$$E = E_k + E_p = \frac{mg^2t^2}{2} + \left( mgH - \frac{mg^2t^2}{2} \right) = mgH = E_{\text{поч}}.$$

Таким чином, ми бачимо, що в процесі падіння механічна енергія тіла, яке вільно падає, дорівнює початковій механічній енергії, тобто *залишається постійною (зберігається)*.

Цей та інші приклади показують:

якщо можна знехтувати тертям, тобто коли між тілами системи діють тільки сили тяжіння і сили пружності, механічна енергія замкнутої системи тіл зберігається.

Це твердження називають *законом збереження механічної енергії*.

Зауважимо, що під час непружних зіткнень механічна енергія не зберігається. Наприклад, якщо зіштовхуються два візки рівних мас, що рухаються з однаковими за модулем швидкостями назустріч один одному, то після непружного зіткнення вони зупиняться. При цьому їхня кінетична енергія дорівнюватиме нулю, хоча початкова кінетична енергія не дорівнювала нулю.

### 3. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ

#### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧІ

Вантаж масою 10 кг піднімають за допомогою троса на 20 м, прикладаючи до нього силу 150 Н. Чому дорівнює робота цієї сили? робота сили тяжіння? Якою стала потенціальна енергія вантажу? кінетична енергія? У початковий момент вантаж перебував у спокої.

**Розв'язання.** Позначимо масу вантажу  $m$ , а висоту підйому  $h$ . На вантаж, що рухається, діють напрямлена вгору сила пружності  $\vec{F}_{\text{пр}}$  з боку троса та напрямлена вниз сила тяжіння  $\vec{F}_T$ . Рівнодійна цих протилежно напрямлених сил не дорівнює нулю, адже вони не рівні за модулем: сила тяжіння  $mg = 100$  Н, а  $F_{\text{пр}} = 150$  Н. Отже, вантаж піднімається з прискоренням, напрямленим вгору.



Таким чином, у даному разі під час підйому вантажу збільшується як його потенціальна енергія (оскільки збільшується висота над Землею), так і кінетична (оскільки збільшується швидкість).

Робота сили пружності додатна:

$$A_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} h = 150 \text{ Н} \cdot 20 \text{ м} = 3\,000 \text{ Дж.}$$

Робота сили тяжіння від'ємна:

$$A_{\tau} = -F_{\tau} h = -mgh = -10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 20 \text{ м} = -2\,000 \text{ Дж.}$$

Потенціальна енергія вантажу тепер дорівнює  $E_p = mgh = 2000 \text{ Дж}$ . Щоб дізнатися його кінетичну енергію, знайдемо, якою стала швидкість вантажу. Рівнодійна сили пружності та сили тяжіння дорівнює за модулем  $F_{\text{пр}} - F_{\tau} = 200 \text{ Н}$ . Отже, вантаж піднімається з прискоренням

$$a = \frac{F_{\text{пр}} - F_{\tau}}{m} = \frac{50 \text{ Н}}{10 \text{ кг}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

За умови рівноприскореного руху без початкової швидкості  $v^2 = 2ah$  (див. § 4. *Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху*), тому

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = m ah = 10 \text{ кг} \cdot 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 20 \text{ м} = 1000 \text{ Дж.}$$

**Відповідь:** 2000 Дж; 1000 Дж.

**Зверніть увагу:** робота сили пружності дорівнює сумі потенціальної та кінетичної енергій вантажу.

#### 4. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Унаслідок тертя *механічна енергія тіла або системи тіл завжди зменшується, а внутрішня енергія збільшується*, тому що тіла нагріваються.

Крім механічної та внутрішньої, існують й інші види енергії, наприклад, електрична та ядерна.

У 40-х роках 19-го століття троє вчених — німці Роберт Майер та Герман Гельмгольц і англієць Джеймс Джоуль — незалежно один від одного висловили припущення, що сумарна енергія *завжди зберігається*, тобто сформулювали

*закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, а може тільки перетворюватися з одного виду в інший.*

Закон збереження енергії багато разів перевірявся в різних дослідях і завжди витримував перевірку. Сьогодні його

вважають одним із найважливіших законів природи, тому що він пов'язує воедино всі явища природи.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Фізичну величину, що характеризує здатність системи взаємодіючих тіл (частин тіла) виконати роботу внаслідок зміни їхнього взаємного положення, називають потенціальною енергією.
- Потенціальна енергія піднятого вантажу  $E_p = mgh$ , де  $m$  — маса вантажу,  $h$  — висота, на яку піднято вантаж.
- Потенціальна енергія zdeформованої пружини  $E_p = \frac{kx^2}{2}$ , де  $k$  — жорсткість пружини,  $x$  — деформація пружини.
- Фізичну величину, що дорівнює роботі, яку виконує тіло, що рухається, під час зменшення його швидкості до повної зупинки, називають кінетичною енергією тіла.
- Кінетична енергія  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , де  $m$  — маса тіла,  $v$  — модуль швидкості тіла.
- Механічною енергією називають суму потенціальної та кінетичної енергій.
- Одиниця енергії — джоуль (Дж).
- Закон збереження механічної енергії: якщо можна знехтувати тертям, тобто якщо між тілами системи діють тільки сили тяжіння та сили пружності, механічна енергія замкнутої системи тіл зберігається.
- Закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, а може тільки перетворюватися з одного виду в інший.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Що таке потенціальна енергія?
2. Чому дорівнює потенціальна енергія піднятого над землею вантажу?
3. Яку потенціальну енергію має вантаж масою 20 кг, піднятий на висоту 10 м?
4. Чому дорівнює потенціальна енергія zdeформованої пружини?
5. У скільки разів збільшиться потенціальна енергія пружини, якщо деформацію пружини збільшити у 3 рази?
6. Чому дорівнює потенціальна енергія пружини жорсткістю 200 Н/м, якщо вона стиснута на 40 см?
7. Що таке кінетична енергія тіла? Чому вона дорівнює?

8. У скільки разів збільшується кінетична енергія тіла, коли його швидкість збільшується у 3 рази?
9. По шосе їдуть два автомобілі однакової маси. Швидкість першого автомобіля вдвічі більша за швидкість другого. У скільки разів кінетична енергія першого автомобіля більша?
10. По шосе їдуть вантажівка і легковий автомобіль. Маса вантажівки 4 т, а маса легкового автомобіля 1 т. З якою швидкістю їде вантажівка, якщо кінетичні енергії автомобілів однакові, а швидкість легкового автомобіля 100 км/год?
11. Що таке механічна енергія? Яка одиниця енергії?
12. За якої умови зберігається механічна енергія?
13. З даху падає бурулька. Як змінюється під час падіння її кінетична енергія? потенціальна? механічна? Прийміть, що опором повітря можна знехтувати.
14. Які перетворення енергії відбуваються під час руху каменя, кинутого вгору? Прийміть, що опором повітря можна знехтувати.

### Другий рівень

15. Пліт пливе за течією річки з постійною швидкістю. Як змінюється з часом потенціальна енергія плоту? кінетична?
16. Пружина жорсткістю 400 Н/м розтягнута силою 200 Н. Чому дорівнює потенціальна енергія здеформованої пружини?
17. Потенціальна енергія розтягнутої на 10 см пружини 100 Дж. Чому дорівнює жорсткість пружини?
18. Якщо розтягнути пружину на 1 см, її потенціальна енергія дорівнюватиме 10 Дж. Чому дорівнюватиме потенціальна енергія цієї ж пружини, якщо її розтягнути ще на 2 см?
19. У скільки разів зростає кінетична енергія автомобіля у разі збільшення його швидкості з 36 до 72 км/год?
20. Камінь кинули вертикально вгору зі швидкістю 18 м/с. На якій висоті його кінетична енергія в 2 рази перевищує потенціальну енергію?
21. З пружинного пістолета роблять постріл у горизонтальному напрямі. Якої швидкості набуває куля масою 50 г, якщо перед пострілом пружина жорсткістю 500 Н/м стиснута на 3 см?
22. Які перетворення енергії відбуваються за наявності тертя?
23. Вантаж падає з висоти 5 м. Наприкінці падіння його швидкість дорівнює 8 м/с. Яка частина початкової потенціальної енергії вантажу перейшла протягом падіння у внутрішню енергію?
24. Хлопчик на санчатах з'їжджає з гори заввишки 20 м. Чому дорівнювала б швидкість санчат у кінці спуску, якби механічна енергія під час спуску зберігалася? Порівняйте цю швидкість зі швидкістю автомобіля, що рухається зі швидкістю 60 км/год.
25. Складіть задачу за темою «Енергія», відповіддю якої було б «На 2 м».



- Імпульсом  $\vec{p}$  тіла називають фізичну величину, що дорівнює добутку маси тіла  $m$  на його швидкість  $\vec{v}$ . Імпульс — векторна величина.
- Замкнутою системою називають систему тіл, що взаємодіють тільки одне з одним і не взаємодіють з іншими тілами.
- Закон збереження імпульсу: векторна сума імпульсів тіл, що складають замкнуту систему, не змінюється.
- Реактивним рухом називають рух тіла, який виникає внаслідок того, що від тіла відокремлюється його частина зі швидкістю відносно тіла. Прикладом реактивного руху є рух ракети.
- Використовувати ракети для освоєння космосу першим запропонував К. Е. Цюлковський. Ю. В. Кондратюк одним із перших розробив теоретичні основи міжпланетних перельотів. Його ім'ям названа розрахована ним траєкторія перельоту до інших планет. Перший штучний супутник Землі було запущено в СРСР у 1957 році. Першим космонавтом незалежної України став Леонід Каденюк.
- Робота сили  $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ , де  $F$  — модуль сили,  $s$  — модуль переміщення,  $\alpha$  — кут між напрямками сили і переміщення.
- Робота — скалярна фізична величина.
- Одиниця роботи — джоуль (Дж).  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .
- Потужністю  $N$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню виконаної роботи  $A$  до проміжку часу  $t$ , за який цю роботу виконано:  $N = \frac{A}{t}$ .
- Одиниця потужності — ват (Вт).  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .
- Потужність транспортного засобу можна виразити через силу тяги та швидкість:  $N = Fv$ .
- Фізичну величину, що характеризує здатність системи взаємодіючих тіл (частин тіла) виконати роботу внаслідок зміни їхнього взаємного положення, називають потенціальною енергією.
- Потенціальна енергія піднятого вантажу  $E_p = mgh$ , де  $m$  — маса вантажу,  $h$  — висота, на яку піднято вантаж.
- Потенціальна енергія zdeформованої пружини  $E_p = \frac{kx^2}{2}$ , де  $k$  — жорсткість пружини,  $x$  — деформація пружини.

- Фізичну величину, що дорівнює роботі, яку виконує тіло, що рухається, під час зменшення його швидкості до повної зупинки, називають кінетичною енергією тіла.
- Кінетична енергія  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , де  $m$  — маса тіла,  $v$  — модуль швидкості тіла.
- Механічною енергією називають суму потенціальної та кінетичної енергій.
- Одиниця енергії — джоуль (Дж).
- Закон збереження механічної енергії: якщо можна знехтувати тертям, тобто якщо між тілами системи діють тільки сили тяжіння та сили пружності, механічна енергія замкнутої системи тіл зберігається.
- Закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, а може тільки перетворюватися з одного виду в інший.

# 3 РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА

---

**§ 16.** Основні положення  
спеціальної теорії відносності

**§ 17.** Деякі наслідки спеціальної теорії  
відносності



## § 16. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

---

1. Принцип відносності Галілея
2. Чи можна поширити принцип відносності на всі фізичні явища?
3. Основні положення спеціальної теорії відносності

### 1. ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ГАЛІЛЕЯ

Ви вже знаєте, що рух є *відносним*: рух будь-якого тіла можна розглядати тільки відносно якогось іншого тіла (тіла відліку).

Для опису руху і взаємодії тіл зазвичай вибирають *інерціальну систему відліку*, оскільки тільки в такій системі зміна швидкості тіла зумовлена дією на нього інших тіл.

Інерціальних систем відліку існує *безліч*, причому

в усіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково (за однакових початкових умов).

Це положення вперше сформулював Галілей, тому його називають *принципом відносності Галілея*.

От як образно пояснював принцип відносності сам Галілей:

«Усамітніться з ким-небудь із друзів у просторому приміщенні під палубою якогось корабля, запасіться мухами, метеликами та іншими дрібними літаючими комахами; нехай буде у вас там також велика посудина з водою і маленькими рибками, що плавають у ній; підвісьте, крім того, угорі відро, з якого вода крапля за краплею капатиме в іншу посудину з вузьким горлечком, підставлену вниз».

Поки корабель стоїть нерухомо, спостерігайте ретельно, як комахи з тією самою швидкістю рухаються навсідіч у приміщенні; риби, як ви побачите, плаватимуть однаково в усіх напрямках; усі падаючі краплі потраплять у підставлену посудину, і вам, кидаючи другу будь-який предмет, не доведеться кидати його з більшою силою в один бік, чим в інший, якщо відстані будуть ті самі; і якщо ви стрибатимете відразу двома ногами, то зробите стрибок на однакову відстань у будь-якому напрямі. Ретельно спостерігайте все це,

хоча у вас не виникає жодного сумніву в тому, що, поки корабель стоїть нерухомо, усе має відбуватися саме так.

Змусьте тепер корабель рухатися з будь-якою швидкістю, і тоді (якщо тільки рух буде рівномірним і без хитавиці) ви не знайдете ані найменшої зміни у всіх названих явищах і тому з жодного з них не зможете встановити, рухається корабель чи стоїть нерухомо... І причина узгодженості всіх цих явищ у тому, що рух корабля загальний для всіх предметів, що є в ньому, так само як і для повітря: тому-то я й сказав, що ви маєте перебувати під палубою...»

З принципу відносності Галілея випливає, що не існує якоїсь одної виділеної системи відліку, яку можна було б назвати «такою, що перебуває у спокої»: усі інерціальні системи відліку цілком рівноправні.

А це означає, що швидкість будь-якого тіла *відносна*: її можна визначити тільки відносно якогось іншого тіла. Наприклад, фраза «ракета летить зі швидкістю 10 км/с» позбавлена сенсу, якщо не зазначено, відносно якого тіла (наприклад, планети чи іншої ракети) рухається наша ракета.

А тепер згадаємо, що рухаються не тільки тіла — ви вже знаєте, що рухаються й *хвилі*, наприклад звукові. Чи є швидкість звуку теж *відносною*? І якщо так, то відносно чого її визначають?

Швидкість звуку визначають відносно *середовища*, у якому він поширюється. Наприклад, коли говорять, що швидкість звуку в повітрі дорівнює 340 м/с, мають на увазі швидкість звуку відносно повітря.

Уявімо собі закритий вагон, що мчить зі швидкістю 30 м/с. У протилежних кінцях вагона сидять двоє чоловіків, які голосно розмовляють один з одним. Відносно вагона звук поширюється в обидва боки з *однаковою* швидкістю, що дорівнює 340 м/с, тому що повітря у вагоні перебуває у спокої відносно вагона. Однак відносно людини на платформі, повз яку мчить цей вагон, швидкість звуку у вагоні в різних напрямках різна! Із закону додавання швидкостей випливає, що в напрямі руху вагона звук усередині вагона рухається зі швидкістю 370 м/с, адже до швидкості звуку в повітрі, яке перебуває у спокої, додається швидкість вагона. Зате в протилежному напрямі звук рухається зі швидкістю всього 310 м/с, бо тепер швидкість вагона віднімається від швидкості звуку в повітрі, яке перебуває у спокої.



## 2. ЧИ МОЖНА ПОШИРИТИ ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ НА ВСІ ФІЗИЧНІ ЯВИЩА?

У багатьох фізиків виникало запитання: а чи можна поширити принцип відносності на *всі* фізичні явища, не обмежуючись тільки механічними? Чи можна, наприклад, поширити його і на *електромагнітні* явища? Досліди безперечно вказували на те, що це так: взаємодії електричних зарядів і електричних струмів у різних інерціальних системах відліку були абсолютно однаковими.

Однак при цьому залишалася одна дуже важлива проблема. Вона стосувалася *поширення світла*.

Англійський фізик Дж. Максвелл теоретично довів, що світло являє собою електромагнітну хвилю, і надалі це підтвердив на досліді німецький фізик Г. Герц. Однак з теорії електромагнітних явищ, побудованої Максвеллом, випливало, що *швидкість світла* у всіх системах відліку має бути *однаковою*! Іншими словами, відповідно до теорії Максвелла швидкість світла була не відносною, як швидкості всіх тіл, а *абсолютною*!

Фізики вирішили перевірити цей дивний висновок з теорії Максвелла на досліді. І досліди підтвердили, що швидкість світла в різних системах відліку дійсно є *однаковою*! Першими поставили такий дослід американські фізики А. Майкельсон та Е. Морлі наприкінці 19-го століття. Вони порівняли швидкість світла, що поширюється в напрямі руху Землі по її орбіті й у протилежному напрямі. Точність експерименту була достатньою для того, щоб «відчутти» збільшення або зменшення швидкості світла на величину швидкості руху Землі (30 км/с), подібно до того, як спостерігач на платформі, повз яку мчить вагон, уловив би різницю швидкості поширення звуку по ходу вагона й у протилежному напрямі. Однак усі досліди переконливо показували, що *світло у вакуумі поширюється завжди з однаковою швидкістю* (приблизно 300 000 км/с).

## 3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Установлена на досліді незалежність швидкості світла від вибору системи відліку позбавляла фізиків, здавалося, будь-якої надії на узагальнення принципу відносності: адже відповідно до принципу відносності швидкість не



може бути абсолютною! Але в той самий час досліди безперечно вказували на те, що всі явища — у тому числі й електромагнітні — протікають у всіх інерціальних системах відліку однаково!

Вирішити цю проблему на початку 20-го століття намагалися багато знаменитих фізиків. Але вдалося це не маститому вченому, а нікому не відомому молодому скромному службовцю патентного бюро у швейцарському місті Берні. Звали його Альберт Ейнштейн<sup>1</sup>.

Коли він став всесвітньо визнаним ученим, Ейнштейн так пояснював те, що відкриття зробив саме він: «Усі знають, що це неможливо. Але от приходить невіглас, який про неможливість не знає, — він і здійснює відкриття». Ейнштейн скромничав, тому що насправді саме він, який назвав себе «невігласом», глибше за всіх проаналізував проблему. Це й дало йому змогу знайти розв'язання — настільки несподіване, що далеко не всі вчені одразу прийняли його теорію.

Ейнштейн узяв установлені на досліді факти за основні положення теорії, названої згодом *спеціальною теорією відносності*.

Ці положення називають *постулатами теорії відносності*. От вони:

1. У всіх інерціальних системах відліку всі фізичні явища протікають однаково.
2. Швидкість світла у вакуумі однакова у всіх інерціальних системах відліку.

Перший постулат називають *принципом відносності Ейнштейна*, щоб відрізнити його від принципу відносності Галілея, що стосується не всіх фізичних, а тільки *механічних* явищ.

Ейнштейн ретельно розглянув, до яких наслідків приводять зазначені постулати, засновані на результатах дослідів. Наслідки ці виявилися дуже незвичайними, однак вони не суперечили жодним відомим дослідам. А наступні досліди цілком підтвердили всі передбачення теорії відносності — у тому числі й ті, які спочатку здавалися дуже дивними.

У наступному параграфі ми розповімо про деякі наслідки теорії відносності. Вони вплинули на весь наступний розвиток фізики і навіть на хід світової історії.

<sup>1</sup> Суттєвий внесок у створення спеціальної теорії відносності зробили данський фізик Генрік Лоренц і французький математик Анрі Пуанкаре.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Принцип відносності Галілея: у всіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково (за однакових початкових умов).
- Постулати спеціальної теорії відносності: 1) у всіх інерціальних системах відліку всі фізичні явища протікають однаково; 2) швидкість світла у вакуумі однакова у всіх інерціальних системах відліку.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Сформулюйте принцип відносності Галілея.
2. Чому фраза «Швидкість катера 25 км/год» без будь-яких доповнень недостатньо точна? Як її уточнити?
3. Скільки існує інерціальних систем відліку?
4. Чому однаковість швидкості світла не узгоджується з принципом відносності Галілея?
5. Чи залежить швидкість світла від вибору системи відліку?
6. Чому закони електродинаміки суперечать принципу відносності Галілея?
7. Сформулюйте принцип відносності Ейнштейна.
8. Сформулюйте другий постулат спеціальної теорії відносності.

## § 17. ДЕЯКІ НАСЛІДКИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

---

1. Відносність одночасності
2. Відносність проміжків часу
3. Енергія тіла
4. Чи скасовує теорія відносності класичну механіку?

### 1. ВІДНОСНІСТЬ ОДНОЧАСНОСТІ

Основним поняттям спеціальної теорії відносності є *подія* — спрощена модель явища, яке в даній системі відліку відбувається в *заданій точці простору в заданий момент часу*. Наприклад, подіями можна вважати вихід людини вранці з дому і повернення додому ввечері, якщо ми нехтуємо розмірами дому, а також проміжками часу, що займають вихід з дому і вхід у дім.

Розглянемо таке запитання: коли можна стверджувати, що дві різні події відбуваються *в одній точці*?

Чи можна, наприклад, стверджувати, що дві зазначених вище події (вихід людини з дому і повернення в дім) відбулися *в одній точці*? Якщо трохи поміркувати, то ми зрозуміємо, що дати *однозначну* відповідь на це запитання неможливо, доки ми не вкажемо систему відліку! У системі відліку, пов'язаній із Землею, ці дві події дійсно відбулися в *одній точці*. Однак у системі відліку, що рухається відносно Землі, це будуть *різні точки*! Наприклад, у системі відліку, пов'язаній із Сонцем, людина разом із Землею рухається по земній орбіті зі швидкістю 30 км/с, тобто за кожну годину людина разом із Землею пролітає в космосі 108 000 км! Отже, якщо людина повернулася додому через 10 годин після виходу з будинку, то за час своєї відсутності вона пролетіла в космосі понад мільйон кілометрів!

Таким чином, твердження, що дві події відбулися в одній точці, є *відносним*: воно справедливе тільки в певній системі відліку. Ця відносність має місце вже в класичній механіці (заснованій на законах Ньютона).



А як щодо *одночасності* двох подій: чи є вона теж відносною, тобто чи можуть дві події бути одночасними в одній системі відліку і неодноразовими — в інших системах відліку?

Саме у відповіді на це запитання і виявляється відмінність спеціальної теорії відносності від класичної фізики.

Відповідно до класичної фізики одночасність двох подій є абсолютною. Однаковий перебіг часу у всіх системах відліку здавався очевидним. Наприклад, якщо два приятелі, які йдуть до школи з різних кінців міста, виходять з дому рівно о 8 годині ранку за сигналом точного часу, то вони вважають, що вийшли з дому *одночасно*.

Покажемо тепер, що з постулатів теорії відносності випливає: дві події, що відбуваються одночасно в *різних* точках в одній системі відліку, в іншій системі відліку, яка рухається відносно першої, можуть не бути одночасними. Розглянемо це на такому прикладі.

Уявімо собі знову вагон, що мчить повз платформи. У певний момент часу точно в центрі вагона відбувається спалах світла. У протилежних кінцях вагона розташовані двері, що відкриваються автоматично в той момент, коли на них падає світло. Поставимо запитання: чи одночасно відчиняться передні й задні двері?

З точки зору пасажирів вагона (тобто в системі відліку, пов'язаній з вагоном) *двері відчиняться одночасно*. Дійсно, від центра вагона до обох дверей світло проходить однакові відстані, що дорівнюють половині довжини вагона. А оскільки світло в будь-якій системі відліку рухається в будь-якому напрямі з однаковою швидкістю, то воно досягне обох дверей одночасно.

Розглянемо тепер ті ж самі події (відчинення двох дверей) з точки зору людини, яка стоїть на платформі, повз яку проноситься вагон. У системі відліку, пов'язаній з платформою (як і в будь-якій іншій), згідно з другим постулатом спеціальної теорії відносності світло рухається в будь-якому напрямі з однаковою швидкістю. Однак передні двері вагона намагаються «утекти» від світла, яке поширюється від центра вагона, а задні, навпаки, рухаються назустріч світлу. Таким чином, світло досягне задніх дверей раніше, ніж передніх, тобто в системі відліку, пов'язаній з платформою, *задні двері відчиняться раніше, ніж передні*.

Отже, згідно з теорією відносності

дві події, що відбуваються одночасно в *різних* точках в даній системі відліку, можуть не бути одночасними в інших системах відліку, що рухаються відносно даної.

Звідси випливає, що в кожній системі відліку є «свій час».

**За якої умови можна помітити відносність одночасності?**

Чому ж «відносність одночасності», яку передбачає спеціальна теорія відносності, не виявляє себе в повсякденному житті? Річ у тім, що вона може проявитися тільки для подій, які розглядають у системах відліку, що рухаються одна відносно одної зі *швидкістю, порівнянною зі швидкістю світла*. А швидкості тіл, з якими ми зустрічаємося в повсякденному житті, у багато разів менші від швидкості світла: адже навіть швидкість звуку в повітрі майже в мільйон разів менша від швидкості світла! Нагадаємо, що перша космічна швидкість, якої треба надати тілу, щоб воно стало супутником Землі, становить близько 8 км/с, що майже в сорок тисяч разів менше від швидкості світла.

## 2. ВІДНОСНІСТЬ ПРОМІЖКІВ ЧАСУ

З постулатів теорії відносності випливають й інші дивовижні висновки.

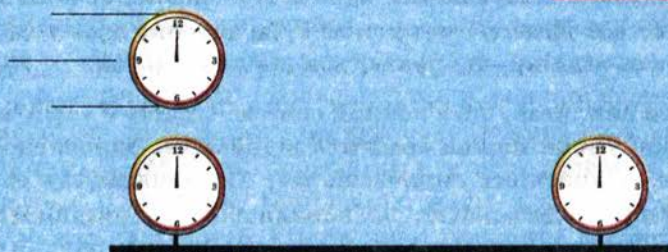
Нехай за своїм годинником пасажир, який їде у вже знайомому нам вагоні, проспав рівно 1 год. При цьому ми розглядаємо дві події (засинання і пробудження пасажирів), які в системі відліку, пов'язаній з вагоном, відбулися *в одній точці* з проміжком часу 1 год. Поставимо запитання: який проміжок часу розділяє ці самі дві події в системі відліку, пов'язаній з платформою, повз яку мчить вагон?

Насамперед зауважимо, що в системі відліку, пов'язаній з платформою, ці події відбулися *в різних точках*: наприклад, заснув пасажир, проїжджаючи повз годинник на одній станції, а прокинувся вже на іншій станції, проїжджаючи повз *інший* годинник! Схематично це зображено на рисунку 17.1, а, б.

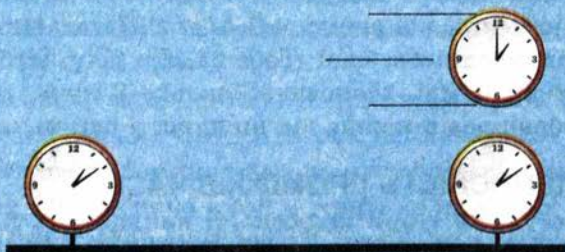
Позначимо  $t_0$  проміжок часу, відмірений за годинником пасажирів, а  $t$  — проміжок часу, що розділяє покази двох *різних* годинників на станціях, повз які проносився вагон у ті моменти, коли пасажир засинав і прокидався. Можна показати, виходячи з постулатів теорії відносності, що для спостерігача на платформі

а

Рис. 17.1



б



$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

де  $v$  — модуль швидкості вагона відносно платформи,  $c$  — модуль швидкості світла.

Знаменник у наведеній вище формулі менше 1, тому  $t > t_0$ . Інакше кажучи, за годинником у системі відліку, пов'язаній з платформою, минуло більше часу, ніж за годинником пасажира. Це означає, що

проміжок часу між двома подіями є відносним, тобто залежить від вибору системи відліку.

При цьому найменший проміжок часу між подіями буде в тій системі відліку, у якій ці події відбулися в одній точці — як «засинання і пробудження пасажира» у нашому прикладі.



Розглянуте явище називають іноді «уповільненням часу в рухомій системі відліку». При цьому, однак, варто мати на увазі, що воно має «симетричний» характер: у *будь-якій* системі відліку годинник, що рухається відносно цієї системи, відстає порівняно з годинником, що перебуває у спокої відносно цієї системи відліку. Але суперечності тут немає, тому що покази *одного* годинника, що рухається відносно цієї системи відліку, порівнюють з показами *різних* годинників, які перебувають у спокої відносно цієї системи відліку.

За якої умови може виявитися уповільнення часу? З наведеної вище формули для проміжків часу видно, що уповільнення часу виявляється тільки за умови, що відносна швидкість двох систем відліку порівнянна зі швидкістю світла. Наприклад, навіть за швидкості, що дорівнює половині швидкості світла, час у системі відліку, що «рухається», сповільнюється не дуже значно: пасажир, проспавши 1 год, побачив би на годиннику станції, повз яку він у цей момент промчав, що минула 1 год 9 хв. Певна річ, наш вагон і пасажир у ньому — тільки уявні: навряд коли-небудь вагони будуть мчати зі швидкістю, що дорівнює половині швидкості світла!

Чим ближче швидкість «вагона» до швидкості світла  $c$ , тим помітнішою буде розбіжність у часі. Так, за швидкості «вагона», що дорівнює  $0,75c$ , годинник у «вагоні» йтиме приблизно в 1,5 рази повільніше, а якщо швидкість вагона становитиме  $0,98c$ , час у «вагоні» сповільнитиметься в 5 разів.

Чи можна сповільнення часу перевірити на досліді? Швидкість елементарних частинок (наприклад, електронів і протонів) у космічних променях та сучасних прискорювачах дуже близька до швидкості світла. І для таких частинок ефекти, що передбачає спеціальна теорія відносності, підтвердилися на досліді. Наприклад, багато частинок нестабільні, тобто через дуже малий проміжок часу розпадаються на інші частинки. Досліди показали: що швидше рухається нестабільна частинка, то довше вона «живе», тобто її «власний годинник» насправді йде повільніше, ніж годинник у лабораторії, що перебуває у спокої відносно Землі. Причому виміряне на досліді «уповільнення часу» точно відповідає наведеній вище формулі.

### 3. ЕНЕРГІЯ ТІЛА

Використовуючи постулати теорії відносності, Ейнштейн вивів вираз для повної енергії тіла масою  $m$ , що рухається зі швидкістю  $v$ :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

З цієї формули випливало дивовижне припущення, завдяки якому 20-те століття стало «сторіччям атома».

Щоб «побачити» цей чудовий наслідок наведеної формули для енергії, розглянемо, який вигляд має ця формула, якщо швидкість тіла  $v$  у багато разів менша від швидкості світла  $c$ . Для цього скористаємося наближеною рівністю

$\frac{1}{\sqrt{1-x}} \approx 1 + \frac{x}{2}$ , яка має місце за умови  $x \ll 1$ . Використовуючи цю наближену рівність, отримуємо, що

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2},$$

тому наведена вище формула для енергії набуває вигляду

$$E = mc^2 \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = mc^2 + \frac{mv^2}{2}.$$

Другий доданок у цій формулі нам добре знайомий: це кінетична енергія тіла в класичній механіці. Що ж являє собою перший доданок? Його називають *енергією спокою* і позначають  $E_0$ . Отже, енергія спокою

$$E_0 = mc^2.$$

Це, напевно, найвідоміша формула у всій фізиці — вона є символом фізики 20-го століття. З неї випливає, що навіть тіло у спокої має енергію вже внаслідок того, що в тіла є маса. Сам Ейнштейн висловив це такими словами: «Маса тіла є мірою енергії, що міститься в ньому».

Енергія, що міститься в тілі, величезна: так, неважко підрахувати, що енергія спокою тіла масою 1 г дорівнює  $9 \cdot 10^{13}$  Дж. Така енергія виділяється під час спалювання приблизно 3000 т вугілля — це навантажений вугіллям потяг довжиною близько кілометра!

З формули  $E_0 = mc^2$  випливає, що внаслідок зменшення маси тіла на  $\Delta m$  виділяється енергія  $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ . Цей висновок

дійсно підтвердився в ядерних реакціях: наприклад, на атомних станціях енергія утворюється внаслідок поділу ядер урану. Це відбувається тому, що сумарна маса продуктів реакції менша від маси ядра урану лише на малі частки відсотка!

Чому ж у повсякденному житті ми не помічаємо такі колосальні запаси енергії, що приховані в тілах навколо нас унаслідок тільки того, що вони мають масу? Річ у тім, що зазвичай зміна енергії тіла така мала, що відповідну їй зміну маси неможливо виміряти навіть найточнішими приладами. Наприклад, унаслідок нагрівання 3 л води від кімнатної температури до температури кипіння маса води (якщо немає випаровування!) збільшується усього на одну стомільйонну частку грама.

Кінетична енергія тіла за довільної швидкості визначається формулою  $E_k = E - E_0$ .

**Швидкість світла — гранична швидкість.** Розглянемо тепер, як змінюється енергія тіла, коли його швидкість наближається до швидкості світла. З наведеної вище формули для повної енергії тіла видно, що коли швидкість тіла наближається до швидкості світла, знаменник у цій формулі наближається до нуля, унаслідок чого енергія тіла наближається до нескінченності. А це означає, що тіло не може досягти швидкості світла. Інакше кажучи, швидкість світла є *граничною швидкістю*: жодне тіло, що має масу, не може рухатися зі швидкістю світла.

Ейнштейн довів, що світло можна уявляти як потік частинок, що отримали назву фотони. Маса фотона дорівнює нулю, і тому він рухається зі швидкістю світла відносно *будь-якої* системи відліку.

#### 4. ЧИ СКАСОВУЄ ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ КЛАСИЧНУ МЕХАНІКУ?

Відповімо відразу на запитання в заголовку цього розділу: ні, не скасовує! Класична механіка є граничним випадком спеціальної теорії відносності у випадку, коли тіла рухаються зі швидкостями, у багато разів меншими від швидкості світла.

На прикладі спеціальної теорії відносності можна проілюструвати одне з найважливіших положень наукового методу — *принцип відповідності*. Згідно з цим принципом нова наукова теорія не скасовує стару, а включає її в себе як граничний випадок. Тому всі припущення старої теорії у сфері її застосовності цілком зберігають свою чинність і в новій теорії. Наприклад, усі висновки спеціальної теорії відносності для



тіл і частинок, що рухаються зі швидкостями, набагато меншими від швидкості світла, цілком збігаються з висновками класичної механіки.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Основним поняттям спеціальної теорії відносності є подія, яка в даній системі відліку відбувається у заданій точці у заданий момент часу.
- Відносність одночасності: відповідно до теорії відносності дві події, що відбуваються одночасно в різних точках в даній системі відліку, можуть не бути одночасними в інших системах відліку, що рухаються відносно даної.
- Проміжок часу між двома подіями є відносним, тобто залежить від вибору системи відліку. Найменший проміжок часу між подіями буде в тій системі відліку, у якій ці події відбулися в одній точці.
- Ефект уповільнення часу виявляється в дослідах з частинками, що рухаються зі швидкостями, близькими до швидкості світла.
- Повна енергія тіла  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , де  $m$  — маса тіла.
- Енергія спокою тіла  $E_0 = mc^2$ .
- Унаслідок зменшення маси тіла на  $\Delta m$  виділяється енергія  $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ . Цей висновок підтвердився в ядерних реакціях.
- Швидкість світла є граничною швидкістю: жодне тіло, що має масу, не може рухатися зі швидкістю світла.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Що таке подія в спеціальній теорії відносності?
2. Що означає відносність твердження, що дві події відбуваються в одній точці простору?
3. Що означає відносність одночасності двох подій?
4. За яких умов відносність одночасності двох різних подій стає помітною?

#### Другий рівень

5. У вагоні потягу, що їде, пасажир відкрив двері купе, а потім їх закрив. У якій системі відліку ці дві події сталися в одній точці? у різних точках? Уявіть, що швидкість потягу порівнянна зі швидкістю світла.
6. У якій системі відліку проміжок часу між двома подіями найменший?
7. Пасажир уявного потягу, який мчить зі швидкістю, близькою до швидкості світла, виставив стрілки свого годинника за годинником

- на станції, повз яку проїздив потяг. Під час руху повз наступну станцію пасажир знову поглянув на свій годинник і годинник на станції. Який годинник показав більший час?
8. Короткоживуча частинка, що перебуває у стані спокою відносно лабораторії, розпадається через  $2 \cdot 10^{-5}$  с. Скільки часу «житиме» ця сама частинка, якщо рухатиметься відносно лабораторного годинника зі швидкістю  $0,9c$  ( $c$  — швидкість світла)?
  9. Знайдіть кінетичну енергію уявного космічного корабля масою  $24$  т, що рухається зі швидкістю  $0,8c$ .
  10. Скільки енергії виділилося за рік внаслідок «спалювання» ядерного палива в ядерному реакторі? Початкова маса палива становила  $192$  т, а продукти «згоряння» мали масу  $191$  т  $999$  кг  $650$  г.
  11. Яка потужність ядерного реактора, згаданого в попередній задачі?
  12. Складіть задачу за темою «Деякі наслідки спеціальної теорії відносності», відповіддю якої було б « $0,8c$ ».

## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- Принцип відносності Галілея: у всіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково (за однакових початкових умов).
- Постулати спеціальної теорії відносності: 1) у всіх інерціальних системах відліку всі фізичні явища протікають однаково; 2) швидкість світла у вакуумі однакова у всіх інерціальних системах відліку.
- Основним поняттям спеціальної теорії відносності є подія, яка в даній системі відліку відбувається у заданій точці у заданий момент часу.
- Відносність одночасності: відповідно до теорії відносності дві події, що відбуваються одночасно в різних точках в даній системі відліку, можуть не бути одночасними в інших системах відліку, що рухаються відносно даної.
- Проміжок часу між двома подіями є відносним, тобто залежить від вибору системи відліку. Найменший проміжок часу між подіями буде в тій системі відліку, у якій ці події відбулися в одній точці.
- Ефект уповільнення часу виявляється в дослідах з частинками, що рухаються зі швидкостями, близькими до швидкості світла.
- Енергія спокою тіла  $E_0 = mc^2$ .
- Унаслідок зменшення маси тіла на  $\Delta m$  виділяється енергія  $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ . Цей висновок підтвердився в ядерних реакціях.
- Швидкість світла є граничною швидкістю: жодне тіло, що має масу, не може рухатися зі швидкістю світла.

# 4 МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

---

**§ 18. Молекулярно-кінетична теорія**

**§ 19. Кількість речовини. Стала Авогадро**

**§ 20. Температура**

**§ 21. Газові закони**

**§ 22. Стани речовини**

**§ 23. Фазові переходи**



## § 18. МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії
2. Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії

### 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

#### ІСНУВАННЯ МОЛЕКУЛ ТА ЇХНІ РОЗМІРИ

З курсів фізики та хімії ви вже знаєте, що речовина складається з атомів і молекул.

Думку про те, що речовина складається з дрібних частинок, першими висловили ще в 5-му столітті до нашої ери давньогрецькі філософи Левкіпп і Демокріт, які стверджували, що у світі є тільки атоми<sup>1</sup> і порожнеча.

Доказ вони наводили, наприклад, такий: вода, висихаючи, дробиться на такі дрібні частини, що зовсім недоступні для ока.

Однак тільки через дві з половиною тисячі років після появи атомної гіпотези — наприкінці 20-го століття — наука досягла рівня, коли вчені змогли побачити атоми. На рисунку 18.1 ви бачите фотографію поверхні золотої фольги, зроблену за допомогою йонного мікроскопа (збільшення у 20 мільйонів разів). Білі плями — це зображення окремих атомів золота!

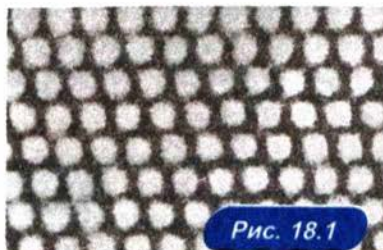


Рис. 18.1

Як оцінити розміри молекул?

<sup>1</sup> Від грецького «атомос», що означає «неподільний».



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Якщо помістити краплину олії на поверхню води, олія розтечеться по ній дуже тонким шаром (рис. 18.2). Максимальна площа олійної плівки відповідає її товщині в одну молекулу. Знаючи об'єм краплини та площу олійної плівки, що утворилася з неї, можна оцінити розмір однієї молекули олії.

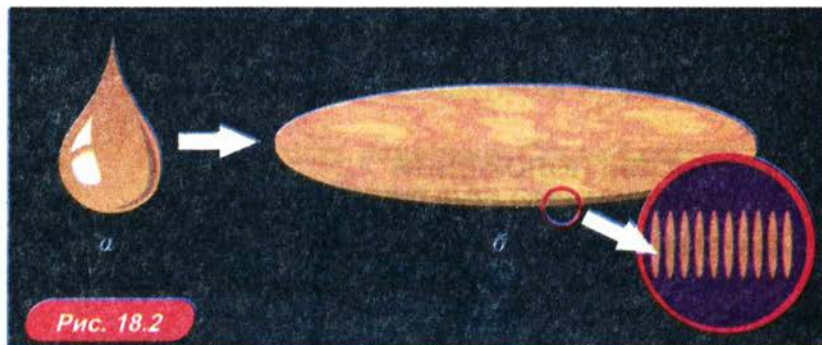


Рис. 18.2

Наприклад, крапля маслинової олії об'ємом  $1 \text{ мм}^3$  розтікається по площі не більше  $1 \text{ м}^2$ . Звідси випливає, що розмір молекули олії приблизно  $10^{-9} \text{ м}$ .

Як можна уявити розміри молекул і атомів? Характерною довжиною у світі молекул є  $10^{-10} \text{ м}$ . Найменша молекула — одноатомна молекула гелію — має розмір близько  $2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Розмір молекули води, що складається з двох атомів Гідроґену та одного атома Оксигену, — близько  $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ .

Щоб ви могли уявити розмір молекули води, наведемо порівняння: в одній чайній ложці води міститься приблизно стільки ж молекул води, скільки чайних ложок води у Світовому океані. Отже, щоб перерахувати молекули води в чайній ложці, знадобилося б стільки ж часу, скільки потрібно для того, щоб вичерпати чайною ложечкою Світовий океан!

### РУХ МОЛЕКУЛ

З якими швидкостями рухаються молекули? У повітрі, що нас оточує, молекули мчать зі швидкостями артилерійських снарядів — сотні метрів за секунду. Ми не відчуваємо своєю шкірою окремих ударів молекул тому, що маси молекул надзвичайно малі, а дріб їхніх ударів — дуже частий. «Барабанний дріб» частих ударів малесеньких молекул сприймається як постійний тиск газу.

З такими ж великими швидкостями рухаються атоми і молекули рідких і твердих тіл навколо нас, а також молекули, з яких складаємося ми самі.

**Броунівський рух.** На початку 19-го століття англійський ботанік Р. Броун, спостерігаючи в мікроскоп за маленькими частинками квіткового пилку рослин, змученими у воді, виявив, що вони перебувають у «вічному танку», безупинно хаотично рухаючись.

Учений припустив, що це рух живих істот, і повторив дослід з потовченими на дрібний пил шматочками каменю. Але й частинки каменю «танцювали без втоми»!

Цей «броунівський рух», як його назвали, залишався загадкою для вчених аж 50 років. Тільки наприкінці 19-го століття вчені здогадалися, що цей рух зумовлений бомбардуванням броунівських частинок молекулами рідини: якщо частинка дуже мала, удари молекул по ній з різних боків не компенсують одні одних, що й викликає безперервний хаотичний рух частинки.

Рис. 18.3 ілюструє хаотичність руху броунівських частинок. На фотографії, зробленій за допомогою мікроскопа, відрізками з'єднано послідовні положення броунівської частинки через 30 с. Якби положення частинки відзначалися не через 30 с, а через 1 с, то кожен відрізок замінила б така сама вигадлива ламана з 30 відрізків.

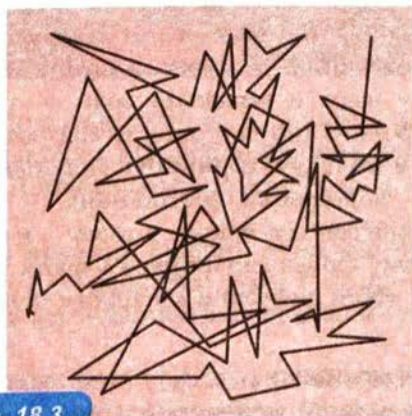


Рис. 18.3

Броунівський рух став першим дослідним підтвердженням молекулярної будови речовини: він відіграв роль «містка» між макросвітом — світом тіл, що безпосередньо спостерігаються — та мікросвітом — світом молекул і атомів.



На початку 20-го століття А. Ейнштейн та польський фізик М. Смолюховський розробили теорію броунівського руху, завдяки якій удалося оцінити розміри молекул.

**Чому рух молекул ніколи не припиняється?** Рух молекул різоче відрізняється від руху предметів, що нас оточують, насамперед тим, що рух молекул ніколи не припиняється. Механічний же рух, як ми вже знаємо, через тертя сповільнюється і зрештою припиняється. Чому ж молекули не зупиняються через тертя?

Річ у тім, що внаслідок тертя механічний рух перетворюється саме в хаотичний (тепловий) рух молекул — адже внаслідок тертя тіла нагріваються. Але самим молекулам «передати» енергію вже нікуди — вони рухаються в порожнечі, зіштовхуючись тільки одна з одною. Під час зіткнень молекул їхня кінетична енергія перерозподіляється між ними таким чином, що середня кінетична енергія молекул залишається незмінною.

Вічний рух малесеньких молекул у цьому відношенні подібний до вічного руху величезних планет: планети, так само як і молекули, рухаються в порожнечі, і тому їхня механічна енергія залишається практично незмінною протягом сотень мільйонів років.

**Дифузія.** Наллємо у високу скляну посудину блакитний розчин мідного купоросу (сульфату міді), а поверх нього обережно — чисту воду (рис. 18.4, а). Межа поділу рідин спочатку буде різкою, але поступово вона почне розмиватися (рис. 18.4, б, в). За деякий час забарвлення рідини стане однорідним (рис. 18.4, г). Отже, частинки мідного купоросу проникають у воду, а молекули води — у мідний купорос. Це взаємне проникання частинок однієї речовини в другу, зумовлене рухом молекул, називають *дифузією* (від латинського «диффузіо» — поширення, розтікання).

Дифузія відбувається також у газах і навіть у твердих тілах. Це означає, що молекули перебувають у невинному хаотичному русі, тобто дифузія є дослідним підтвердженням руху молекул.

### ВЗАЄМОДІЯ МОЛЕКУЛ

**Природа взаємодії молекул.** Взаємодія молекул має електричну природу. Хоча молекули в цілому електрично нейтральні, розподіл позитивних і негативних електричних зарядів у них такий, що на великих відстанях (порівняно з розмірами самих молекул) молекули притягуються, а на малих відстанях — відштовхуються.

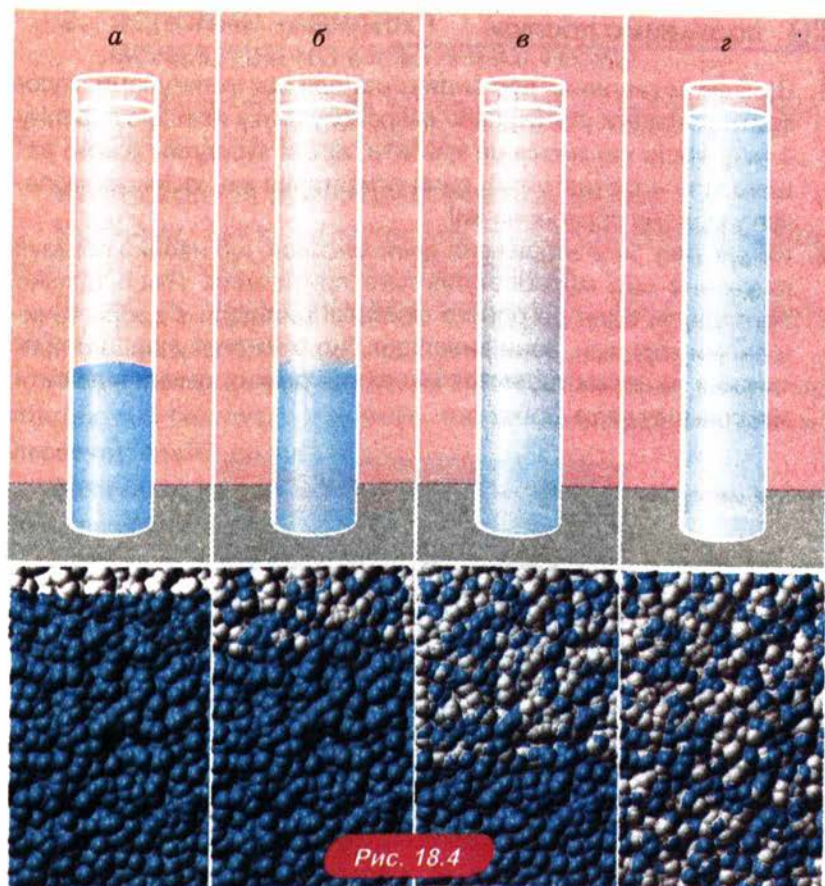


Рис. 18.4

Взаємодію молекул описують за допомогою квантової механіки — науки про рух і взаємодію дрібних частинок речовини. Про основні її положення ми розповімо в курсі фізики 11-го класу.

**Прояв взаємодії молекул.** Притяганням молекул зумовлене існування рідин і твердих тіл: коли б не це притягання, рідини й тверді тіла розсипалися б на окремі молекули (перетворившись у газу).

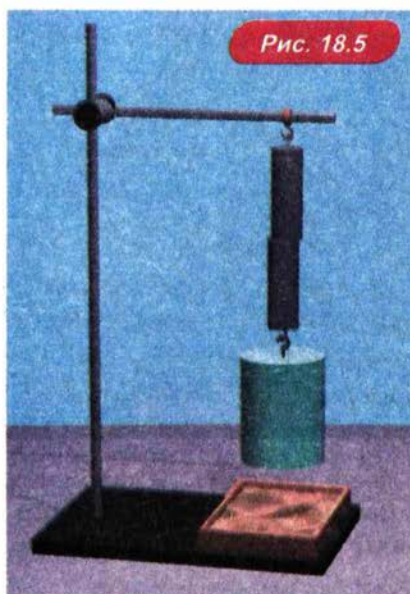
На дуже малих відстанях притягання молекул змінюється відштовхуванням, завдяки чому об'єм рідини або твердого тіла дуже важко зменшити стискуванням: тому говорять, що рідини й тверді тіла практично нестискувані.

Силами притягання і відштовхування молекул пояснюються пружність та міцність твердих тіл (див. § 8. *Сили в механіці. Сила пружності*).





1. Щоб мати уявлення про сили взаємодії між молекулами, спробуйте розірвати сталеву або капронову нитку площею перерізу  $1 \text{ мм}^2$ . Мало хто зможе це зробити, але ж зусиллям усього вашого тіла «протистоять» сили притягання малюсіньких молекул у малому перерізі нитки!
2. На рисунку 18.5 зображена демонстрація, що наочно показує існування сил міжмолекулярного притягання. Якщо щільно притиснути один до одного свинцеві циліндри з добре зачищеними торцями, вони внаслідок сил міжмолекулярного притягання «зчіплюються» так міцно, що до них можна підвісити кілограмову гирю.



### ТРИ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

Отже, виходячи з дослідів, можна сформулювати основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

- усі речовини складаються з дрібних частинок — атомів і молекул;
- частинки речовини перебувають у безперервному хаотичному русі;
- частинки речовини взаємодіють між собою.



## 2. ОСНОВНЕ ЗАВДАННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

Молекулярно-кінетична теорія пов'язує властивості речовини з рухом і взаємодією молекул.

### МАКРОСКОПІЧНІ ТА МІКРОСКОПІЧНІ ПАРАМЕТРИ

Величини, що характеризують стан макроскопічних тіл, називають *макроскопічними* параметрами.

Приклади макроскопічних параметрів: маса тіла, його об'єм, тиск і температура.

Макроскопічні параметри застосовні тільки до макроскопічних тіл: безглуздо говорити, наприклад, про тиск чи температуру однієї молекули.

Величини, що характеризують властивості окремих молекул, називають *мікроскопічними* параметрами.

Приклади мікроскопічних параметрів: маса молекули, середня швидкість молекул та їх середня кінетична енергія.

### РІВНЯННЯ СТАНУ

Досліди показують, що макроскопічні параметри, які характеризують дане тіло, зв'язані один з одним. Наприклад, якщо за постійного тиску збільшувати температуру газу, його об'єм збільшується.

Завдання молекулярно-кінетичної теорії — пояснити співвідношення між макроскопічними параметрами на основі уявлення про рух і взаємодію молекул.

Щоб сформулювати це завдання чіткіше, уведемо поняття рівняння стану. Так називають співвідношення між макроскопічними параметрами, наприклад між температурою, об'ємом і тиском.

Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії — вивести рівняння стану речовини, установивши зв'язок між макроскопічними та мікроскопічними параметрами.

Німецький фізик Р. Клаузіус установив залежність між тиском ідеального газу і середньою квадратичною швидкістю молекул газу

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

У нашому курсі ми зможемо (і то з деякими спрощеннями) вирішити основне завдання молекулярно-кінетичної теорії для найпростішого випадку — коли речовина перебуває в газоподібному стані. Але й при цьому ми зможемо багато чого дізнатися про світ молекул.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Усі речовини складаються з дрібних частинок, що перебувають у безперервному хаотичному русі та взаємодіють одна з одною.
- Дифузією називають взаємне проникання частинок однієї речовини в другу, зумовлене рухом молекул.
- Величини, що характеризують стан макроскопічних тіл у цілому, називають макроскопічними параметрами. Основні макроскопічні параметри — тиск, об'єм і температура.
- Величини, що характеризують властивості окремих молекул речовини, називають мікроскопічними параметрами. Приклади мікроскопічних параметрів — маса молекули та середня кінетична енергія молекул.
- Рівнянням стану називають співвідношення між макроскопічними параметрами — температурою, об'ємом і тиском.
- Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії — вивести рівняння стану речовини, установивши зв'язок між макроскопічними та мікроскопічними параметрами.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Наведіть приклади дослідного обґрунтування положень молекулярно-кінетичної теорії.
3. Які свідчення існування атомів вам відомі?
4. Які характерні розміри атомів і молекул?
5. Опишіть дослід, за допомогою якого можна оцінити розмір молекули.
6. Що таке броунівський рух? Чому він відіграв важливу роль у становленні молекулярно-кінетичної теорії?
7. Що таке дифузія? Проілюструйте свою відповідь прикладом.
8. Чому рух молекул ніколи не припиняється?
9. Яка природа взаємодії молекул?
10. Які досліди та спостереження вказують на те, що молекули взаємодіють між собою?

## Другий рівень

11. Чи відчуваємо ми удари молекул, з яких складається повітря? Якщо так, то як саме ми їх відчуваємо?
12. На поверхні води крапля олії об'ємом  $0,08 \text{ мм}^3$  розтікається в пляму площею не більше  $0,05 \text{ м}^2$ . Який висновок стосовно розмірів молекул олії можна зробити за результатами досвіду?
13. Молекули пахучих речовин рухаються в повітрі зі швидкостями сотні метрів на секунду. Чому ж запахи за відсутності вітру поширюються набагато повільніше?
14. Що таке макроскопічні параметри? Наведіть приклади.
15. Що таке мікроскопічні параметри? Наведіть приклади.



## § 19. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ. СТАЛА АВОГАДРО

1. Відносна молекулярна (атомна) маса
2. Кількість речовини

### 1. ВІДНОСНА МОЛЕКУЛЯРНА (АТОМНА) МАСА

Маси атомів і молекул, як і будь-які маси, можна виражати в кілограмах: наприклад, маса молекули води дорівнює приблизно  $3 \cdot 10^{-26}$  кг. Однак набагато зручніше порівнювати маси атомів і молекул з масою найлегшого атома — атома Гідрогену, оскільки маси всіх атомів і молекул з достатньо високою точністю кратні масі цього атома. Наприклад, маса атома Карбону приблизно у 12 разів більша від маси атома Гідрогену.

Ми не випадково згадали про Карбон: із суто технічних причин<sup>1</sup> як атомну одиницю маси (скорочено а.о.м.) вибрали саме 1/12 маси атома Карбону. Однак для більшості розрахунків (у тому числі під час розв'язання задач) можна прийняти, що 1 а.о.м. дорівнює масі атома Гідрогену.

Масу молекули, виражену в атомних одиницях маси, називають відносною молекулярною масою. Відносна молекулярна маса позначається  $M_r$ .

Отже,

відносна молекулярна маса  $M_r$  дорівнює відношенню маси  $m_0$  молекули даної речовини до 1/12 маси атома Карбону  $m_{0C}$ , тобто 
$$M_r = \frac{m_0}{(1/12)m_{0C}}.$$

### Приклади

1. Відносна молекулярна маса Гелію дорівнює 4, бо гелій — одноатомний газ і маса атома Гелію в 4 рази більша від маси атома Гідрогену, яку можна вважати рівною 1 а.о.м.
2. Відносна молекулярна маса водню дорівнює 2 (бо водень — двоатомний газ).

<sup>1</sup> Зумовлених точністю відтворення одиниці виміру.

Аналогічно відносній молекулярній масі визначається і відносна атомна маса як маса атома, виражена в атомних одиницях маси.

### ЯК ЗНАЙТИ ВІДНОСНУ АТОМНУ І МОЛЕКУЛЯРНУ МАСУ

Значення відносної атомної маси для даної речовини можна знайти за допомогою періодичної системи елементів (таблиці Менделєєва), округливши наведене в ній значення до цілого<sup>1</sup>. Наприклад, відносні атомні маси Гелію, Карбону і Оксигену дорівнюють відповідно 4, 12 і 16.

Щоб знайти відносну молекулярну масу речовини, треба знати її хімічну формулу і відносні атомні маси атомів, що входять до складу молекули даної речовини.

Наприклад, відносна молекулярна маса води дорівнює 18, бо згідно з хімічною формулою води ( $\text{H}_2\text{O}$ ) молекула води складається з двох атомів Гідрогену (з відносною атомною масою 1) та одного атома Оксигену (з відносною атомною масою 16).

## 2. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ

Величину, що визначає кількість молекул у даному зразку речовини, називають *кількістю речовини*. Про два тіла, що складаються з однакової кількості молекул, говорять, що вони мають однакову кількість речовини, хоча маси цих тіл можуть суттєво відрізнятись.

### ОДИНИЦЯ КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ — МОЛЬ

Як одиницю кількості речовини вибрали таку кількість молекул, щоб їхня загальна маса, виражена в грамах, чисельно дорівнювала відносній молекулярній масі. Цю одиницю кількості речовини назвали *моль*.

Оскільки 1 а.о.м. дорівнює  $1/12$  маси вуглецю, то

один моль — це кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів Карбону міститься у 12 г вуглецю.

Кількість речовини в зразку, виражену в молях, позначають  $\nu$ .

Для більшості розрахунків (у тому числі під час розв'язування задач) можна прийняти, що один моль містить стільки ж молекул, скільки атомів Гідрогену міститься в 1 г водню.

### Приклади

1. Один моль водню ( $\text{H}_2$ ) має масу 2 г, оскільки відносна молекулярна маса водню дорівнює 2 (нагадаємо, що молекула водню складається з двох атомів).

<sup>1</sup> Нецілі значення відносних атомних мас у таблиці Менделєєва зумовлені існуванням у природі ізоотопів — атомів тієї самої речовини з різними масами.

2. Один моль кисню ( $O_2$ ) має масу 32 г.
3. Один моль води ( $H_2O$ ) має масу 18 г (приблизно одна столова ложка).

Тіла з різних речовин, що містять однакову кількість речовини (тобто однакову кількість молекул), мають зазвичай різні маси: тіло, молекули якого більш масивні, має і більшу масу. Наприклад, маса одного моля кисню в 16 разів більша від маси одного моля водню.

### СТАЛА АВОГАДРО

Відповідно до означення моля, *в одному молі будь-якої речовини міститься однакова кількість молекул*. Вимірювання показали, що вона дорівнює  $6 \cdot 10^{23}$  (точніше  $6,02 \cdot 10^{23}$ ). На честь італійського вченого Амедео Авогадро, який відкрив, що багато властивостей тіл (особливо газів) визначаються саме кількістю молекул,

кількість молекул в одному молі називають сталою Авогадро:  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ .

Величезне значення сталої Авогадро можна спробувати уявити, удавшись до «всесвітніх масштабів».

Астрономи оцінили: кількість галактик у частині Всесвіту, що спостерігається, — близько мільярда ( $10^9$ ), а кожна галактика містить сотні мільярдів зір (приблизно  $10^{11}$ ). Отже, кількість зір у частині Всесвіту, що спостерігається, — близько  $10^{20}$ . Це дуже величезне число, але воно в тисячі разів менше за сталу Авогадро, тобто менше за кількість молекул в одній столовій ложці води!

Прояснимо зміст сталої Авогадро на конкретному прикладі.

Маса одного моля води, що містить  $N_A$  молекул, дорівнює 18 г, а маса однієї молекули води дорівнює 18 а.о.м. Таким чином, стала Авогадро є перевідним множником між грамом і атомною одиницею маси: в одному грамі міститься якраз  $N_A$  атомних одиниць маси<sup>1</sup>.

**Молярна маса.** Масу одного моля речовини називають *молярною масою*. Молярну масу позначають  $M$  і вимірюють у кг/моль.

Наприклад, молярна маса води дорівнює  $18 \text{ г/моль} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ , а молярна маса водню дорівнює  $2 \text{ г/моль} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

<sup>1</sup> Тому вимірювання сталої Авогадро — це, власне кажучи, вимірювання маси атома (наприклад, атома Карбону).



## ДЕЯКІ КОРИСНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Кількість молекул  $N$  у тілі пов'язана з кількістю речовини  $\nu$  співвідношенням  $N = \nu N_A$ .

Наприклад, якщо в тілі 2 моля, то в ньому  $1,2 \cdot 10^{24}$  молекул, а якщо в тілі  $3 \cdot 10^{24}$  молекул — то в ньому 5 молів.

В одному молі речовини масою  $M$  міститься  $N_A$  молекул масою  $m_0$  кожна, тому  $m_0 = M/N_A$ .

Оскільки  $M$  — маса одного моля, то кількість речовини у тілі масою  $m$  дорівнює  $\nu = m/M$ . Кількість молекул у тілі  $N = \nu N_A = (m/M) N_A$ .

### Приклади

1. У 180 г води міститься 10 молів (оскільки маса одного моля води дорівнює 18 г) і, отже,  $6 \cdot 10^{24}$  молекул.
2. У 1 кг водню міститься 500 молів (маса одного моля водню дорівнює 2 г) і, отже,  $3 \cdot 10^{26}$  молекул.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Атомна одиниця маси (а.о.м.) дорівнює  $1/12$  маси атома Карбону. З достатньою точністю можна вважати, що атомна одиниця маси дорівнює масі атома Гідрогену.
- Відносна молекулярна маса  $M_r$  дорівнює масі молекули, вираженій в атомних одиницях маси.
- Один моль — це кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів Карбону міститься в 12 г вуглецю. Кількість речовини в молях позначають  $\nu$ .
- Сталою Авогадро називають кількість молекул в одному молі:

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

- Молярна маса речовини  $M$  дорівнює масі одного моля цієї речовини. Маса тіла  $m$  пов'язана з молярною масою співвідношенням  $m = M\nu$ . Маса  $m_0$  молекули речовини пов'язана з його молярною масою співвідношенням  $m_0 = M/N_A$ .



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Що таке атомна одиниця маси?
2. Що таке відносна молекулярна (атомна) маса?
3. Як визначити відносну молекулярну (атомну) масу?
4. Чому дорівнює відносна атомна маса Гідрогену?
5. Чому дорівнює відносна молекулярна маса кисню?

6. Що таке кількість речовини?
7. Як визначають одиницю кількості речовини?
8. Скільки молекул в одному молі?
9. Що таке стала Авогадро? Чому вона дорівнює?
10. Що таке молярна маса?

### Другий рівень

11. Чому дорівнює відносна молекулярна маса води?
12. Яка маса одного моля вуглекислого газу?
13. Скільки молів у літрі води?
14. Як пов'язані маса молекули, молярна маса та стала Авогадро?
15. Чому дорівнює маса молекули метану ( $\text{CH}_4$ )?
16. Як знайти кількість молекул у даному тілі, якщо відомі маса тіла та молярна маса речовини?
17. Скільки молекул міститься в 1 г вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ )?
18. Відносна молекулярна маса певної речовини дорівнює 100 а.о.м. Скільки молів цієї речовини міститься в зразку масою 2 кг?
19. Скільки молекул у краплі води масою 0,1 г?
20. Скільки молекул міститься в повній склянці води об'ємом 200  $\text{cm}^3$ ?
21. Який об'єм краплі води, якщо в цій краплі міститься  $10^{22}$  молекул?
22. Де більше атомів Оксигену: у 10 молях води чи 5 молях кисню? У скільки разів?
23. Складіть задачу за темою «Кількість речовини. Става Авогадро», відповіддю якої було б «3 моль».

## § 20. ТЕМПЕРАТУРА

---

### 1. Температура та її вимірювання

#### 2. Абсолютна шкала температур

### 1. ТЕМПЕРАТУРА ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

У побуті температуру розуміють як «міру нагрітості» тіл: «гарячі» тіла мають більш високу температуру, ніж «холодні».

Однак таке уявлення про температуру дуже суб'єктивне, адже навіть одній людині той самий предмет може одночасно здаватися теплим і холодним. Щоб переконатися в цьому, проведіть такий простий дослід. Помістіть на кілька хвилин палець лівої руки в склянку з холодною водою, а палець правої — у склянку з теплою водою. Потім одночасно занурте пальці обох рук у склянку з водою кімнатної температури.

Ваша ліва рука «скаже» вам, що ця вода тепла, а права — що та сама вода холодна!

Отже, довіряти суб'єктивним відчуттям, визначаючи температуру, не можна: треба визначити температуру так, щоб її можна було вимірювати.

### ТЕПЛОВА РІВНОВАГА І ТЕМПЕРАТУРА

Якщо привести в контакт (стикання) два тіла — холодне і гаряче, то холодне тіло почне нагріватися, а гаряче — остигати. Температура кожного з цих тіл змінюватиметься доти, доки їхні температури не зрівняються.

Отже, температура характеризує стан теплової рівноваги: тіла, що перебувають у тепловій рівновазі, мають однакову температуру.

Як ви вже знаєте, температура характеризує кінетичну енергію хаотичного руху молекул: чим вища температура, тим більша кінетична енергія хаотичного руху.



## ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Практично всі тіла під час нагрівання розширюються. Це використовують при виготовленні термометрів — приладів для вимірювання температури. У побуті часто користуються рідинними термометрами (рис. 20.1). Щоб розширення рідини було більш помітним, рідина в термометрі піднімається під час розширення по дуже тонкій трубці.

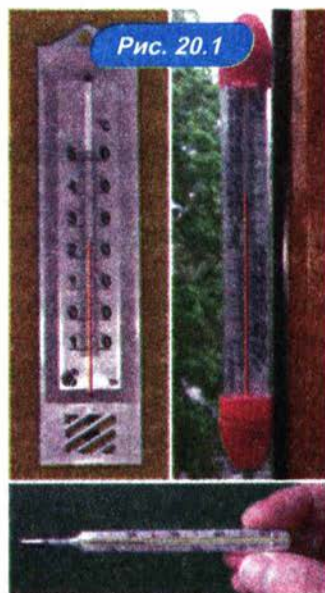


Рис. 20.1

**Шкала Цельсія.** Визначаючи температурну шкалу, спочатку вибирають дві так звані «опорні точки» — температури, за яких відбуваються певні явища при визначених температурах (наприклад, танення льоду і кипіння води за атмосферного тиску). Потім на трубку термометра наносять шкалу, поділяючи відстань між «опорними точками» на рівні частини. Наприклад, за температурною шкалою Цельсія<sup>1</sup> температурі танення льоду відповідає 0 градусів, а температурі кипіння води за атмосферного тиску відповідає 100 градусам. Температуру за шкалою Цельсія<sup>1</sup> позначають маленькою літерою  $t$  і записують, наприклад, так:  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Який термометр показує «правильну» температуру?** Якщо на термометрах з різними рідинами розділити шка-

<sup>1</sup> Ця дуже поширена температурна шкала названа на ім'я шведського астронома, який запропонував прообраз цієї шкали.

лу між  $0^{\circ}\text{C}$  і  $100^{\circ}\text{C}$  на рівні частини, то покази цих термометрів можуть суттєво відрізнятися, адже різні рідини розширюються по-різному. Наприклад, коли ртутний термометр за рівномірної розмітки шкали показує  $50$  градусів, гліцериновий покаже  $47,6$  градусів. І немає ніяких аргументів на користь того, який термометр вважати «правильним»!

Ще значнішими будуть відмінності в показах кожного з цих термометрів і водяного термометра. Річ у тім, що вода під час нагрівання та охолодження поводить незвичайно: під час нагрівання від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $4^{\circ}\text{C}$  вона не розширюється, а стискується<sup>1</sup>. І тому покази водяного термометра під час нагрівання від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $4^{\circ}\text{C}$  не збільшуватимуться, а зменшуватимуться!

По-різному розширюються унаслідок нагрівання і тверді тіла.

На щастя, є багато речовин, які під час нагрівання розширюються *однаково*. Зараз ми про них розповімо.

## 2. АБСОЛЮТНА ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

У багатьох дослідах було встановлено, що *гази під час нагрівання розширюються однаково*<sup>2</sup>.

### ГАЗОВИЙ ТЕРМОМЕТР



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Візьмемо циліндричну посудину, у якій газ під поршнем нагрівається за постійного тиску. Відзначимо на стінці посудини «опорні точки», що відповідають  $0^{\circ}\text{C}$  і  $100^{\circ}\text{C}$ , а потім нанесемо між ними мітки на рівних відстанях одна від одної (рис. 20.2).

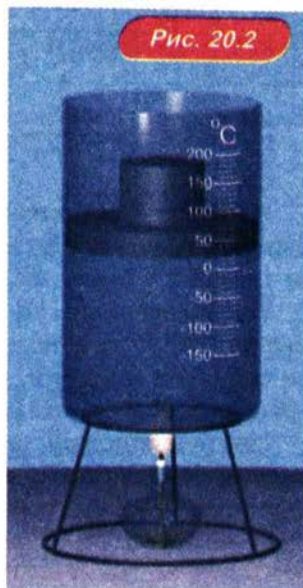


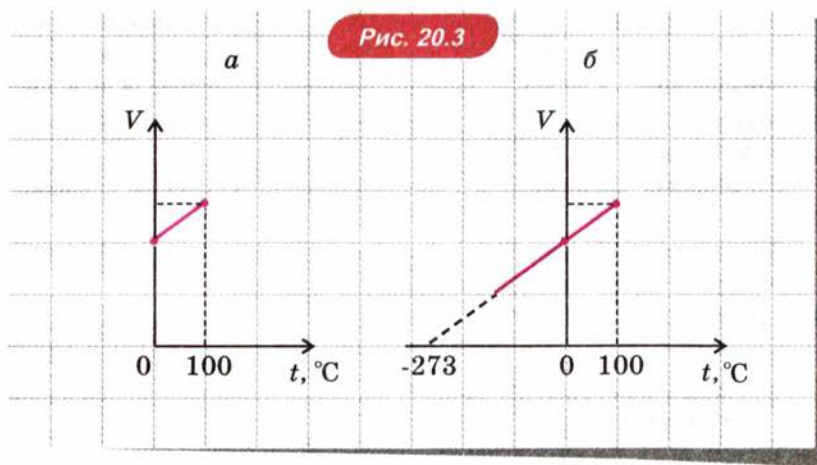
Рис. 20.2

<sup>1</sup> Тому річки й озера в середніх широтах не промерзають узимку до дна.

<sup>2</sup> Досить точно ця залежність виконується для розріджених газів. Оскільки індивідуальні властивості газів за таких умов не виявляються, у фізиці використовують фізичну модель — ідеальний газ. Реальні гази практично не відрізняються від ідеального газу за невеликих тисків та температур, які значно більші за абсолютний нуль.

Ми зробили таким чином газовий термометр, визначивши температуру як величину, що лінійно залежить від об'єму газу за постійного тиску.

Відзначимо на шкалі газового термометра опорні точки, що відповідають температурам  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Співвідношення між об'ємом газу і температурою за шкалою Цельсія в цьому інтервалі температур показано на графіку, наведеному на рисунку 20.3, а.



Якщо ми продовжимо цей графік убік від'ємних температур, то побачимо, що об'єм газу мав би перетворитися в нуль за  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 20.3, б)!

Насправді цього не відбувається, оскільки під час охолодження до дуже низьких температур усі гази перетворюються спочатку в рідини, а потім — у тверді тіла (тому ділянку графіка в області низьких температур намічено пунктиром).

Проте виявилось, що температура  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$  дійсно є «абсолютним холодом»: у наступному параграфі ми побачимо, що така температура відповідає «припиненню» теплового руху молекул.

### АБСОЛЮТНА ТЕМПЕРАТУРА

У середині 19-го століття англійський учений Кельвін запропонував нову шкалу температур, нуль якої відповідає «абсолютному холоду», тобто  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а зміна температури на один градус дорівнює зміні температури на один градус за шкалою Цельсія.



Цю шкалу температур називають *шкалою Кельвіна* або *абсолютною шкалою*, а температуру, що вимірюють за цією шкалою, — *абсолютною температурою*<sup>1</sup>.

Нуль за абсолютною шкалою температур називають *абсолютним нулем температури*. Як уже говорилося, це найнижче можливе значення абсолютної температури<sup>2</sup>.

Абсолютну температуру позначають великою літерою  $T$ .

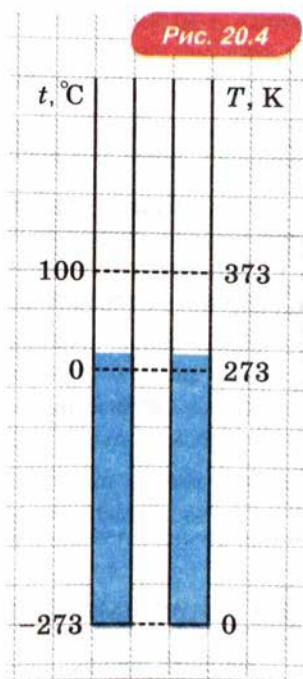
Одиницю абсолютної температури називають *кельвін* і позначають  $K$ .

Розглядаючи процеси, що відбуваються з газами, ми користуватимемось переважно абсолютною температурою.

**Співвідношення між шкалою Цельсія та абсолютною шкалою температур.** З означення абсолютної температури випливає, що абсолютна температура  $T$  і температура  $t$  за шкалою Цельсія пов'язані співвідношенням:  $T = t + 273$  (рис. 20.4). На рисунку позначено характерні точки: абсолютний нуль температури, температура танення льоду та температура кипіння води за атмосферного тиску. Забарвлений стовпчик схематично показує кімнатну температуру: температурі  $20^\circ C$  відповідає  $293 K$ .

**Співвідношення між об'ємом газу та абсолютною температурою.** Щоб зобразити графічно співвідношення між об'ємом газу  $V$  та його абсолютною температурою  $T$ , досить зсунути шкалу температур на графіку, наведеному вище (рис. 20.3, б), на  $273$  градуси ліворуч.

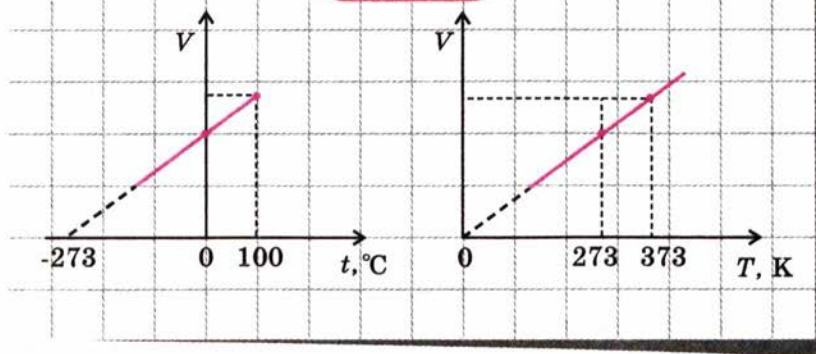
Для наочності обидва графіки — з температурою за шкалою Цельсія та з температурою за шкалою Кельвіна — зображено поряд на рис. 20.5.



<sup>1</sup> Абсолютну шкалу температур ще називають термодинамічною шкалою, оскільки її чітке визначення дається в термодинаміці.

<sup>2</sup> Дослідження процесів у різних системах за температури, близької до абсолютного нуля, займається кріофізика. Одним із провідних наукових центрів кріофізики є Фізико-технічний інститут низьких температур — ФТІНТ (Харків, Україна).

Рис. 20.5



Зверніть увагу: за постійного тиску об'єм даної маси газу прямо пропорційний абсолютній температурі. Ми повернемося до цього в наступному параграфі.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Температура характеризує стан теплової рівноваги: тіла, що перебувають у тепловій рівновазі, мають однакову температуру.
- Абсолютною температурою називають температуру за абсолютною шкалою температур (шкалою Кельвіна), а нуль за цією шкалою — абсолютним нулем температури. Він відповідає  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  за шкалою Цельсія. Абсолютну температуру позначають  $T$ .
- Абсолютна температура  $T$  і температура  $t$  за шкалою Цельсія пов'язані співвідношенням:  $T = t + 273$ .



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Чому не завжди можна довіряти визначенню температури на дотик? Наведіть приклади на підтвердження вашої відповіді.
2. Тіло А перебуває в тепловій рівновазі з тілом Б, а тіло Б — з тілом В. Що можна сказати про температури тіл А і В?
3. Як визначають шкалу температур за Цельсієм?
4. Як визначають абсолютну температуру за допомогою газового термометра?
5. Яким є співвідношення між абсолютною температурою і температурою за шкалою Цельсія?

6. Чому дорівнює абсолютна температура повітря в кімнаті, якщо термометр на стіні кімнати показує  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
7. Ртутний термометр показує температуру  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якій абсолютній температурі це відповідає?
8. Чи може людина витримувати температуру  $300\text{ K}$ ? Якій температурі за Цельсієм вона відповідає?
9. Температура повітря збільшилася на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На скільки кельвінів змінилася вона при цьому?
10. Чи існує найнижча температура? Якщо так, то чому вона дорівнює?

### Другий рівень

11. Як пов'язане поняття температури з поняттям теплової рівноваги?
12. Унаслідок нагрівання стовпчик рідинного термометра в скляній трубці піднімається. Яка речовина розширюється під час нагрівання більше — рідина в трубці чи скло, з якого виготовлено трубку?
13. Під час нагрівання рівень рідини в скляній посудині знижується. Яка це може бути рідина? У якому інтервалі температур рідини проводили цей дослід?
14. Чим відрізняється розширення газів від розширення рідин і твердих тіл?
15. Зобразіть графічно, як пов'язані температура за шкалою Цельсія з абсолютною температурою.
16. Чим зумовлене існування найнижчої температури?
17. Складіть задачу за темою «Температура», відповіддю якої було б « $373\text{ K}$ ».



## § 21. ГАЗОВІ ЗАКОНИ

### 1. Ізопроцеси

### 2. Рівняння стану газу

#### 1. ІЗОПРОЦЕСИ

Надалі ми будемо вивчати властивості достатньо розрідженого газу (таким газом, наприклад, є повітря навколо нас). У такому газі розміри молекул набагато менші від відстаней між молекулами, а взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

Тому ми можемо скористатися *моделлю* такого газу, яку називають ідеальним газом.

*Ідеальний газ* — модель газу, розмірами молекул якого можна знехтувати, а взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

Розглянемо газові процеси, у яких один із трьох параметрів — тиск  $p$ , об'єм  $V$  чи температура  $T$  залишається постійним, а два інших змінюються.

Такі процеси називають *ізопроцесами*<sup>1</sup>.

#### ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС (ЗА ПОСТІЙНОГО ТИСКУ)

Процес, що відбувається з даною масою газу за постійного тиску, називають ізобарним<sup>2</sup>. Під час ізобарного процесу змінюються температура та об'єм газу.

З ізобарним процесом ми вже ознайомилися, вивчаючи розширення газу внаслідок нагрівання (див. § 20. *Температура*). Відповідно до означення абсолютної температури

під час ізобарного процесу відношення об'єму даної маси газу до його абсолютної температури залишається постійним:  $\frac{V}{T} = \text{const}$  за умови  $p = \text{const}$ .

<sup>1</sup> Від грецького слова «ісос» — рівний.

<sup>2</sup> Від грецьких слів «ісос» і «барос» — вага. Порівняйте назву ізобарного процесу з назвою приладу «барометр» для вимірювання тиску.

Це співвідношення називають законом Гей-Люссака на честь французького вченого, який дослідив ізобарний процес.

Співвідношення між об'ємом даної маси газу та абсолютною температурою за постійного тиску зображено графічно на рисунку 21.1. Цей графік називають *ізобарою*. Він показує, що за постійного тиску об'єм газу прямо пропорційний його абсолютній температурі.

Із закону Гей-Люссака випливає, що для двох станів (позначимо їх 1 і 2) даної маси газу за постійного тиску виконується співвідношення  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ . Наприклад, якщо абсолютна температура збільшується в 3 рази, об'єм газу збільшується теж у 3 рази.

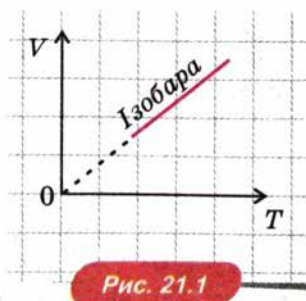


Рис. 21.1

### ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС (ЗА ПОСТІЙНОГО ОБ'ЄМУ)

Процес, що відбувається з даною масою газу за постійного об'єму, називають ізохорним<sup>1</sup>. Під час ізохорного процесу змінюються температура і тиск газу.



### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Скористаємося установкою, зображеною на рисунку 21.2.

Гофровану циліндричну посудину, яка містить певну масу повітря, з'єднаємо з манометром<sup>2</sup> (приладом для вимірювання тиску) і помістимо в посудину з водою, яку можна нагрівати.

Вимірюючи залежність тиску газу від абсолютної температури за постійного об'єму, ми побачимо, що

під час ізохорного процесу відношення тиску даної маси газу до його абсолютної температури залишається постій-

ним:  $\frac{P}{T} = \text{const}$  за умови  $V = \text{const}$ .

<sup>1</sup> Від грецьких слів «іzos» і «хорема» — посудина.

<sup>2</sup> З курсу фізики 8-го класу ви вже знаєте: дія манометра ґрунтується на тому, що пружна мембрана, яка герметично закриває порожню коробку, під дією сили тиску рідини або газу трохи прогинається. Прогин мембрани передається стрілці, що вказує значення тиску.

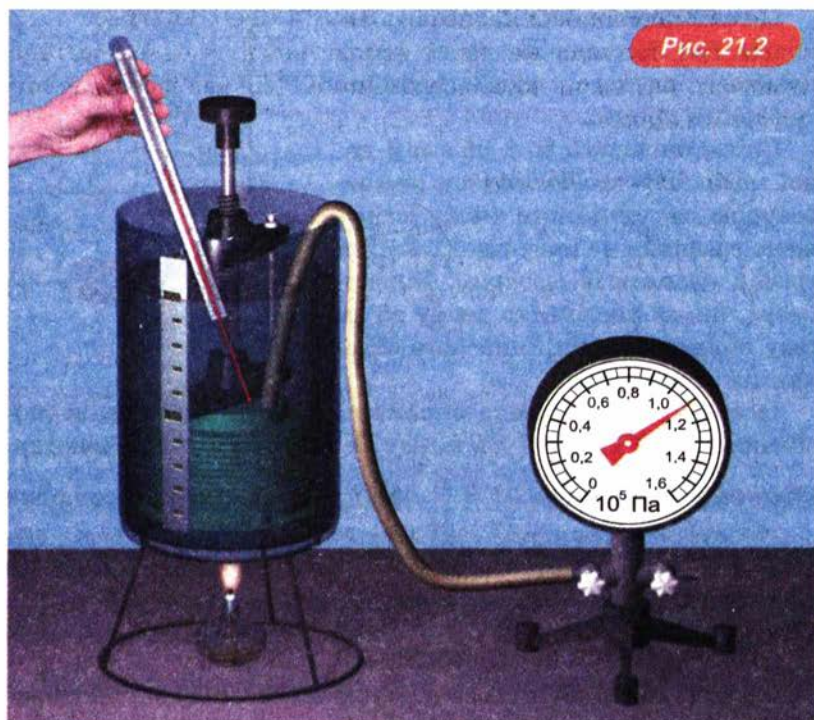


Рис. 21.2

Це співвідношення називають законом Шарля, тому що залежність тиску газу від температури дослідив наприкінці 18-го століття французький учений Жак Шарль.

Графік залежності тиску даної маси газу від температури за постійного об'єму зображено на рис. 21.3.

Цей графік називають *ізохорою*. Він показує, що за постійного об'єму тиск газу прямо пропорційний його абсолютній температурі.

Із закону Шарля випливає, що для двох станів (1 і 2) даної маси газу за постійного об'єму виконується співвідношення  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

Наприклад, якщо абсолютна температура газу збільшилася вдвічі, то тиск газу збільшився теж удвічі.

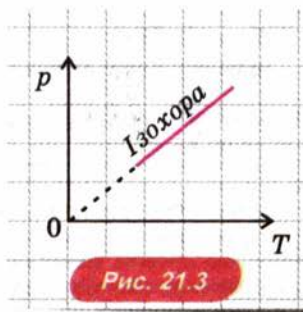


Рис. 21.3



## ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС (ЗА ПОСТІЙНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ)

Процес, що відбувається з даною масою газу за постійної температури, називають ізотермічним. Під час ізотермічного процесу змінюються об'єм і тиск газу.



### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Скористаємося вже знайомою нам установкою з гофрованою циліндричною посудиною (рис. 21.4).

Об'єм посудини можна змінювати, повертаючи гвинт.

Сталість температури газу забезпечується контактом з навколишнім повітрям: якщо об'єм газу змінюється досить повільно, температура газу залишається рівною температурі навколишнього повітря.

Вимірюючи залежність тиску газу від його об'єму за постійної температури, ми побачимо, що

під час ізотермічного процесу добуток тиску даної маси газу на його об'єм залишається постійним:  $pV = \text{const}$  за умови  $T = \text{const}$ .

Це співвідношення встановили на досліді в другій половині 17-го століття англійський учений Роберт Бойль та французький учений Едм Маріотт, тому його називають законом Бойля—Маріотта.

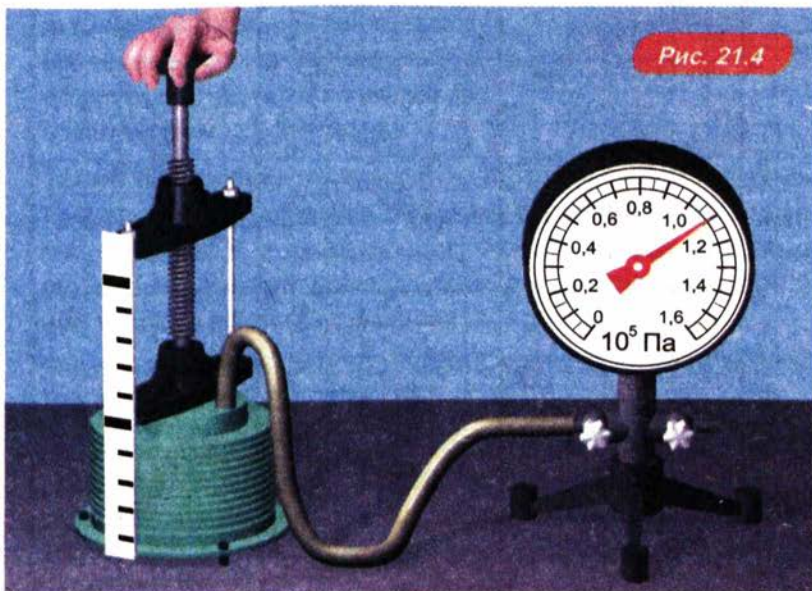
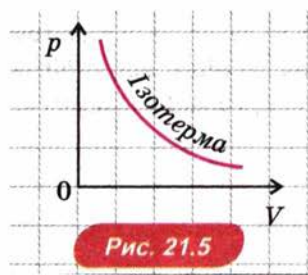


Рис. 21.4



Графік залежності тиску даної маси газу від об'єму за постійної температури зображено на рис. 21.5.

Цей графік називають *ізотермою*. Він показує, що за постійної температури тиск газу обернено пропорційний його об'єму.

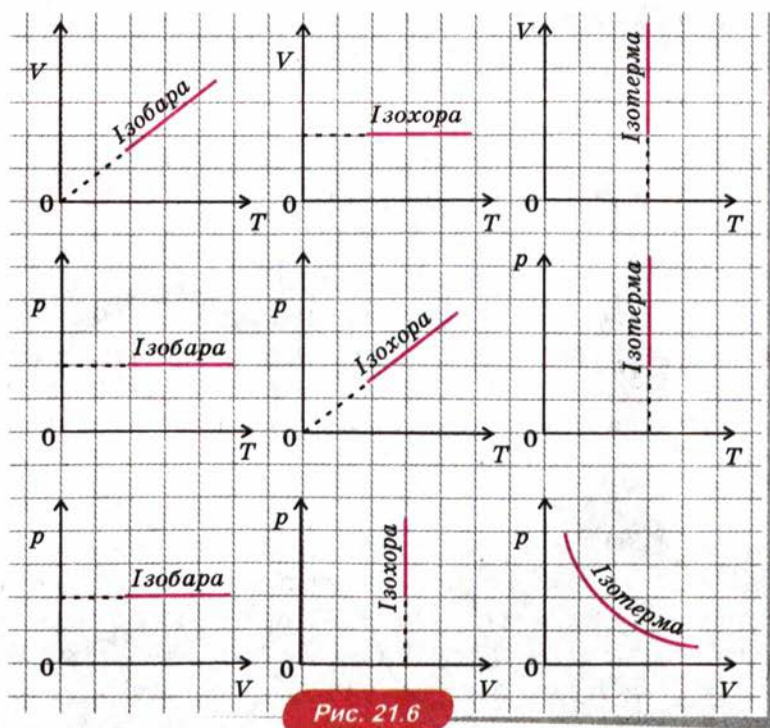
Із закону Бойля—Маріотта випливає, що для двох станів (1 і 2) даної маси газу за постійної температури

виконується співвідношення  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ . Наприклад, якщо об'єм газу в 3 рази збільшився, то тиск газу в 3 рази зменшився.

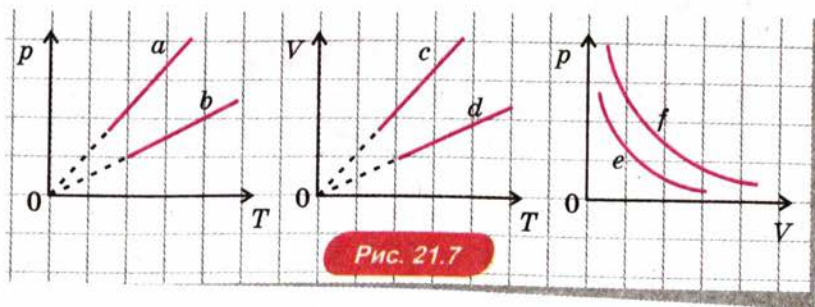
## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧІ

1. Побудуємо графіки всіх ізопроеців у координатах  $(V, T)$ ,  $(p, T)$ ,  $(p, V)$ .

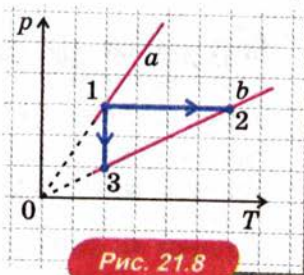
**Розв'язання.** Див. рис. 21.6.



2. На рисунку 21.7 зображено дві ізохори ( $a$  і  $b$ ), дві ізобари ( $c$  і  $d$ ) та дві ізотерми ( $e$  і  $f$ ). Якій ізохорі відповідає більший об'єм, якій ізобарі — більший тиск, та якій ізотермі — більша температура?



**Розв'язання.** Розглянемо спочатку ізохори  $a$  та  $b$ . Переведемо газ з деякого стану 1, що лежить на ізохорі  $a$ , у стан 2, що лежить на ізохорі  $b$ , за допомогою ізобарного процесу (рис. 21.8). У процесі 1–2 температура газу збільшується, а оскільки під час ізобарного процесу об'єм газу прямо пропорційний абсолютній температурі, то збільшується й об'єм газу. Отже, ізохорі  $b$  відповідає більший об'єм газу, ніж ізохорі 1.



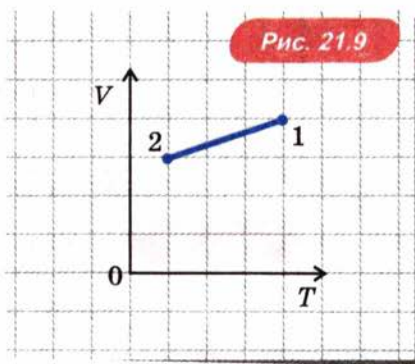
Такого ж висновку можна дійти, розглядаючи ізотермічний процес 1–3, що відповідає переходу в стан, який лежить також на ізобарі  $b$ . У цьому процесі тиск зменшився, а оскільки під час ізотермічного процесу об'єм газу обернено пропорційний тиску, то об'єм газу збільшився.

Таким чином, ізобарі  $b$ , що лежить нижче ізобари  $a$ , відповідає більший об'єм.

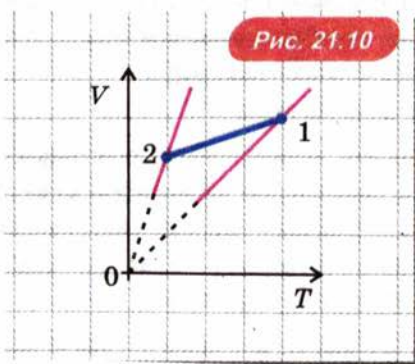
Міркуючи аналогічно, можна порівняти тиски для двох ізобар і температури для двох ізотерм. Ми отримаємо, що ізобарі  $d$ , яка лежить нижче ізобари  $c$ , відповідає більший об'єм, а ізотері  $f$ , що лежить вище ізотерми  $e$ , відповідає більша температура.



3. На рисунку 21.9 наведено графік процесу, що відбувається з даною масою газу, у координатах  $V, T$ . Чи змінюється в процесі 1–2 тиск газу і якщо так, то як саме: збільшується чи зменшується?



**Розв'язання.** Насамперед зауважимо, що процес 1–2 не можна віднести до жодного з видів ізопроцесів: за графіком видно, що станам 1 і 2 відповідають різні об'єми та температури, а ізобари, що відповідають цим станам, різні, тобто змінюється і тиск газу (рис. 21.10).



З розв'язання попередньої задачі ми вже знаємо, що більший тиск у координатах  $V, T$  відповідає тій ізобарі, що лежить нижче. Отже, тиск у стані 1 більший, ніж у стані 2. Таким чином, у процесі 1–2 тиск газу зменшується.

## 2. РІВНЯННЯ СТАНУ ГАЗУ

### РІВНЯННЯ КЛАПЕЙРОНА

Дотепер ми розглядали тільки такі газові процеси, за яких один із трьох параметрів, що характеризують стан даної маси газу (тиск  $p$ , об'єм  $V$  чи температура  $T$ ), залишався незмінним. У загальному ж випадку в ході процесу можуть змінюватися всі три параметри —  $p$ ,  $V$ ,  $T$ .

У першій половині 19-го століття французький фізик Бенуа Клапейрон вивів співвідношення, що пов'язує ці параметри:

для даної маси газу добуток тиску газу на його об'єм, поділений на абсолютну температуру газу, є величина стала:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.}$$

Це співвідношення називають *рівнянням Клапейрона*.

Легко помітити, що рівняння всіх трьох ізопроеесів є окремими випадками рівняння Клапейрона. Дійсно, за умови  $p = \text{const}$  отримуємо  $V/T = \text{const}$ ; за умови  $V = \text{const}$  отримуємо  $p/T = \text{const}$ ; за умови  $T = \text{const}$  отримуємо  $pV = \text{const}$ .

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Гофровану герметично закриту посудину з газом перенесли із суміші води з льодом у воду, що кипить. При цьому об'єм газу збільшився у півтора раза. Збільшився чи зменшився тиск газу? На скільки відсотків змінився тиск?

**Розв'язання.** Позначимо початкові параметри газу  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ , а кінцеві параметри  $p_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ . Початкова температура газу<sup>1</sup> дорівнює  $0^\circ\text{C}$ , що відповідає  $273\text{ K}$ , а кінцева температура дорівнює  $100^\circ\text{C}$ , що відповідає  $373\text{ K}$ . За умовою маса газу не змінюється (посудина герметично закрита), тому застосуємо рівняння

Клапейрона й отримаємо  $\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$ . Звідси  $\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}$ . Від-

повідно до умови  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{2}{3}$ ,  $\frac{T_2}{T_1} = \frac{373}{273}$ . Отже,  $\frac{p_2}{p_1} = \frac{2 \cdot 373}{3 \cdot 273} = 0,91$ .

**Відповідь:** тиск газу зменшився на 9 %.

<sup>1</sup> Однією з поширеніших помилок під час розв'язування задач на газові процеси є те, що температуру, задану в умові задачі за шкалою Цельсія, забувають перевести в абсолютну шкалу температур.

## ЗАКОН АВОГАДРО

Ми бачили, що для процесів, які відбуваються з даною масою газу, значення виразу  $pV/T$  постійне. Якщо ж маса газу в процесі змінюється, то змінюється і значення цього виразу. У цьому легко переконатися на власному досвіді. Надміть щоби: при цьому одночасно збільшаться і тиск, і об'єм повітря в роті, а температура повітря залишиться практично незмінною (рівною температурі тіла). Отже, значення виразу  $pV/T$  збільшилося!

Відповідь на запитання, від чого залежить значення виразу  $pV/T$ , дає закон, установлений Авогадро на початку 19-го століття дослідним шляхом:

за однакових температури й тиску в рівних об'ємах різних газів міститься однакова кількість молекул.

Із закону Авогадро випливає, що  $\frac{pV}{T} = kN$ , де коефіцієнт пропорційності  $k$  для всіх газів однаковий. Його назвали сталою Больцмана на честь австрійського фізика, одного із творців молекулярно-кінетичної теорії. Вимірювання показали, що  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Користуючись рівнянням  $\frac{pV}{T} = kN$ , тиск газу можна виразити через концентрацію газу  $n = \frac{N}{V}$  та його абсолютну температуру. Ми отримаємо:  $p = \frac{N}{V} kT = nkT$ .

## РІВНЯННЯ МЕНДЕЛЄЄВА—КЛАПЕЙРОНА

Щоб вивести рівняння стану газу, до якого входить також маса газу, виразимо у співвідношенні  $\frac{pV}{T} = kN$  кількість молекул  $N$  через масу газу  $m$  та його молярну масу  $M$  за допомогою співвідношення  $N = \frac{m}{M} N_A$  (див. § 19. Кількість речовини. Стала Авогадро). Ми отримаємо  $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} kN_A = \frac{m}{M} R$ , де  $R = kN_A$  — так звана універсальна газова стала:  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Отримане співвідношення називають рівнянням Менделєєва—Клапейрона, тому що вперше його вивів російський



учений Менделєєв у другій половині 19-го століття. Зазвичай його записують у такому вигляді:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \text{ де } m \text{ і } M — \text{ маса газу та молярна маса.}$$

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Циліндрична посудина розділена рухомим поршнем на дві частини: в одній частині міститься водень, а в другій — кисень. Яку частину посудини займає кожний з газів, якщо тиски, температури і маси газів однакові?

**Розв'язання.** Позначимо тиск газів  $p$ , температуру газів  $T$ , а масу кожного з газів  $m$ . Об'єми і молярні маси водню та кисню позначимо відповідно  $V_{\text{H}}$ ,  $M_{\text{H}}$  і  $V_{\text{O}}$ ,  $M_{\text{O}}$ . Запишемо рівняння Менделєєва—Клапейрона для цих газів:  $pV_{\text{H}} = \frac{m}{M_{\text{H}}} RT$  і  $pV_{\text{O}} = \frac{m}{M_{\text{O}}} RT$ .

Поділивши перше рівняння на друге, маємо  $\frac{V_{\text{H}}}{V_{\text{O}}} = \frac{M_{\text{O}}}{M_{\text{H}}} = 16$ .

Отже, об'єм водню в 16 разів більший за об'єм кисню.

Таким чином, за однакових маси, тиску і температури газів водень займає 16/17 об'єму посудини, а кисень — тільки 1/17. Зумовлена ця «нерівність» тим, що за однакової маси газів кількість молекул водню в 16 разів більша, ніж кількість молекул кисню. Ця задача — наочна ілюстрація того, що багато властивостей газів визначаються не масою, а кількістю молекул, тобто кількістю речовини!

**Відповідь:** водень займає 16/17 об'єму посудини, а кисень — 1/17.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Ідеальний газ — модель газу, розмірами молекул якого можна знехтувати, а взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

- Ізопроеци: для даної маси газу  $\frac{V}{T} = \text{const}$  за умови  $p = \text{const}$

(ізобарний процес);  $\frac{P}{T} = \text{const}$  за умови  $V = \text{const}$  (ізохорний

процес);  $pV = \text{const}$  за умови  $T = \text{const}$  (ізотермічний процес).

- Рівняння Клапейрона:  $\frac{pV}{T} = \text{const.}$
- Закон Авогадро: за однакових температури і тиску в рівних об'ємах різних газів міститься однакова кількість молекул.
- Наслідками рівняння Клапейрона і закону Авогадро є співвідношення  $pV = kN$  і  $p = nkT$ , де  $k$  — стала Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.
- Рівняння Менделєєва—Клапейрона:  $pV = \frac{m}{M} RT$ , де  $m$  — маса газу,  $M$  — його молярна маса,  $R = 8,31$  Дж/моль·К — універсальна газова стала.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Який процес називають ізобарним? Як пов'язані об'єм газу і його температура в умовах ізобарного процесу? Запишіть відповідну формулу і накресліть графік цього процесу.
2. Який процес називають ізохорним? Як пов'язані тиск газу і його температура в умовах ізохорного процесу? Запишіть відповідну формулу і накресліть графік цього процесу.
3. Який процес називають ізотермічним? Як пов'язані тиск газу та його об'єм в умовах ізотермічного процесу? Запишіть відповідну формулу і накресліть графік цього процесу.
4. Яке співвідношення між тиском, об'ємом і температурою для даної маси газу? Як називають це співвідношення?
5. Сформулюйте закон Авогадро.
6. Запишіть рівняння Менделєєва—Клапейрона. Які величини входять до цього рівняння?

### Другий рівень

7. Чи можуть перетинатися дві різні ізохори? Ізобари? Ізотерми? Обґрунтуйте свою відповідь.
8. Два різні стани газу відповідають двом різним точкам на тій самій ізохорі. Чи може бути однаковим тиск газу в цих станах?
9. Відзначте в координатах  $V, T$  дві точки, що відповідають станам 1 і 2 так, що  $p_1 > p_2$ .
10. Побудуйте графіки процесу, що відбувається з даною масою ідеального газу (рис. 21.11), у координатах  $V, T$  і  $p, V$ .

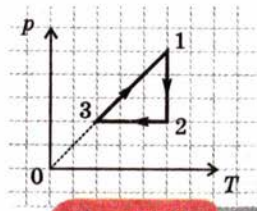


Рис. 21.11

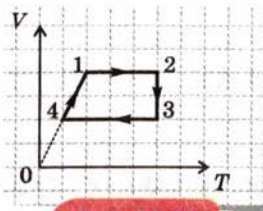


Рис. 21.12

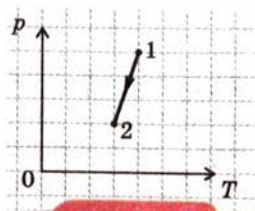


Рис. 21.13

11. Побудуйте графіки процесу, що відбувається з даною масою ідеального газу (рис. 21.12), у координатах  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$ .
12. Збільшувався чи зменшувався об'єм даної маси ідеального газу при переході від стану 1 до стану 2 (рис. 21.13)?
13. Виведіть рівняння Клапейрона, використовуючи ізотермічний та ізобарний процеси.
14. Об'єм даної маси газу збільшили вдвічі, а абсолютну температуру зменшили вдвічі. Як змінився тиск газу?
15. Об'єм даної маси газу зменшили вдвічі, а тиск газу збільшили вдвічі. Як змінилася абсолютна температура газу?
16. Тиск даної маси газу збільшили в 3 рази, а абсолютну температуру зменшили вдвічі. Як змінився об'єм газу?
17. Абсолютна температура даної маси газу збільшилася вдвічі, а його об'єм збільшився при цьому в 3 рази. Чи змінився при цьому тиск газу? Якщо так, то в скільки разів?
18. Абсолютна температура даної маси газу зменшилася в 3 рази, а його тиск зменшився при цьому в 1,5 рази. Чи змінився при цьому об'єм газу? Якщо так, то в скільки разів?
19. Тиск даної маси газу зменшився на 50 %, а об'єм збільшився на 20 %. Як змінилася абсолютна температура газу?
20. Тиск газу збільшився вдвічі, об'єм зменшився в 3 рази, а абсолютна температура зменшилася на 20 %. Чи змінилася маса газу? Якщо так, то на скільки відсотків?
21. Циліндрична посудина розділена рухомих поршнем на дві частини: в одній частині міститься водень, а в другій — азот. Маса якого газу більша і в скільки разів, якщо поршень знаходиться точно на середині посудини?
22. Як пов'язані між собою стала Больцмана, стала Авогадро та універсальна газова стала?
23. Складіть задачу за темою «Газові закони», відповіддю якої було б «Втричі».



## § 22. СТАНИ РЕЧОВИНИ

---

1. Порівняння газів, рідин і твердих тіл
2. Кристали, аморфні тіла та рідини
3. Інші стани речовини

### 1. ПОРІВНЯННЯ ГАЗІВ, РІДИН І ТВЕРДИХ ТІЛ

З курсу фізики попередніх класів ви вже знаєте, що:

- тверді тіла зберігають об'єм і форму;
- рідини зберігають об'єм, але не зберігають форму: унаслідок плинності рідина зазвичай набуває форми посудини<sup>1</sup>;
- гази не зберігають ні об'єму, ні форми: газ заповнює всю посудину, у якій він міститься.

Властивості газів ми розглянули вище. Розглянемо тепер властивості твердих тіл та рідин.

#### ЧИ МОЖЕ ТА САМА РЕЧОВИНА ПЕРЕБУВАТИ В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ?

Ми звикли до того, що вода може існувати в трьох станах — твердому (лід), рідкому (власне вода) і газоподібному (пара). Більшість же інших речовин ми вважаємо істинно твердими, рідкими чи газоподібними: наприклад, залізо ми вважаємо твердим тілом, а водень — газом.

Однак залізо може бути і рідким, і газоподібним, а водень — і рідким, і твердим: за температури  $1539^{\circ}\text{C}$  залізо плавиться, а за  $3200^{\circ}\text{C}$  закипає, перетворюючись у газ; водень за температури  $-253^{\circ}\text{C}$  скраплюється, а за  $-259^{\circ}\text{C}$  твердне.

На сьогодні встановлено, що будь-яка проста речовина може перебувати в кожному з трьох агрегатних станів — твердому, рідкому чи газоподібному: стан речовини залежить від температури і тиску.

---

<sup>1</sup> Але не завжди: наприклад, маленькі краплини мають кулясту форму. Це буде пояснено у розділі «Рідини» цього параграфа.

## **ЧОМУ ВЛАСТИВОСТІ ВСІХ ГАЗІВ МАЙЖЕ ОДНАКОВІ, А ВЛАСТИВОСТІ РІДИН І ТВЕРДИХ ТІЛ РІЗНІ?**

Молекули газів взаємодіють тільки під час порівняно рідких зіткнень. Тому властивості газів визначаються переважно *рухом молекул*, а він у всіх газах однаковий: між рідкісними зіткненнями молекули рухаються рівномірно і прямолінійно. От чому властивості різних газів так схожі.

Властивості ж твердих тіл і рідин визначаються переважно *взаємодією* атомів і молекул. А оскільки атоми і молекули різних речовин взаємодіють по-різному, то і властивості рідин і твердих тіл надзвичайно різноманітні.

## **ЯК РОЗТАШОВАНІ МОЛЕКУЛИ Й АТОМИ В ГАЗАХ, РІДИНАХ І ТВЕРДИХ ТІЛАХ?**

У газах молекули перебувають у середньому на відстанях, що набагато перевищують розміри самих молекул. Наприклад, у повітрі відстань між молекулами приблизно в 10 разів більша за розміри молекул. А в рідинах та твердих тілах атоми й молекули розташовані практично впритул. Про це свідчить мала стисливість рідин і твердих тіл: щоб зменшити об'єм рідини чи твердого тіла, треба прикласти дуже велику силу.

## **2. КРИСТАЛИ, АМОΡФНІ ТІЛА ТА РІДИНИ**

Тверді тіла бувають кристалічними та аморфними. Розглянемо спочатку кристали.

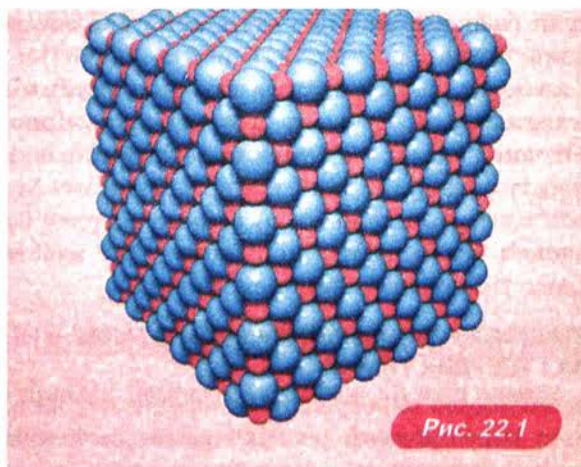
### **КРИСТАЛИ**

Приклади кристалів — кухонна сіль, алмаз, метали.

У кристалах атоми або молекули розташовані упорядковано, утворюючи кристалічні ґратки.

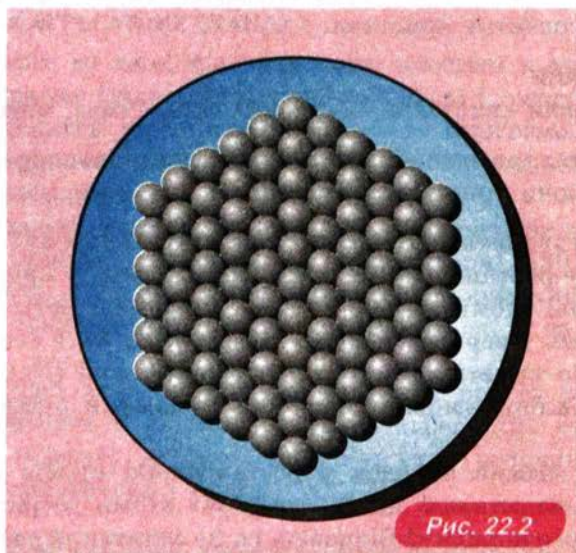
Тому говорять, що в кристалічних тілах існує далекий порядок у розташуванні атомів. Наприклад, у кристалі кухонної солі атоми натрію і хлору чітко чергуються, розташовуючись у вершинах куба. На рисунку 22.1 схематично зображено кристалічні ґратки кухонної солі (NaCl). Йони натрію і хлору умовно позначено кульками різних діаметрів.

Такий чіткий порядок у розташуванні атомів кристала викликає запитання: що ж «змушує» атоми дотримуватися його чіткого порядку? Відповідь на це запитання дає простий дослід.



### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Насиплемо на увігнуте скло однакові маленькі металеві кульки і почнемо легенько струшувати його. Ми побачимо, що незабаром кульки розташуються в чіткому порядку, який дуже нагадує порядок атомів у кристалі (рис. 22.2).





Розгадка такого упорядкування кульок полягає в тому, що вони розташовуються на увігнутому склі в найнижчому з можливих положень, що відповідає *мінімальному значенню потенціальної енергії* кульок.

З тієї самої причини упорядковуються й атоми кристала: вони займають положення, що відповідає *мінімальному значенню потенціальної енергії взаємодії атомів*.

**Плавлення кристалічних тіл.** Досліди показують, що

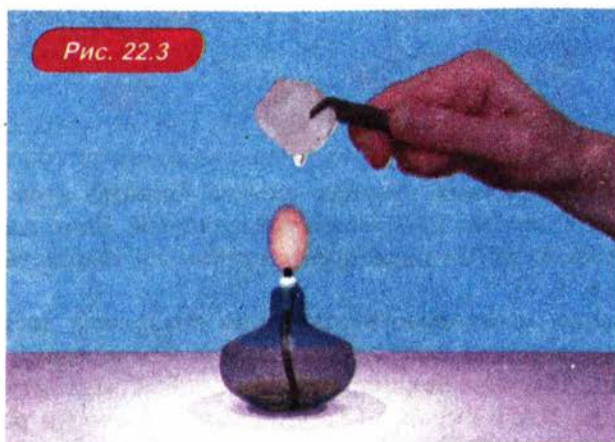
кристали плавляться за певної температури, яку називають *температурою плавлення*.

Наприклад, лід плавиться при  $0^{\circ}\text{C}$ : за температури вище  $0^{\circ}\text{C}$  вода рідка, а за температури нижче  $0^{\circ}\text{C}$  — тверда (лід). При  $0^{\circ}\text{C}$  може існувати суміш льоду з водою, наприклад мокрий сніг.



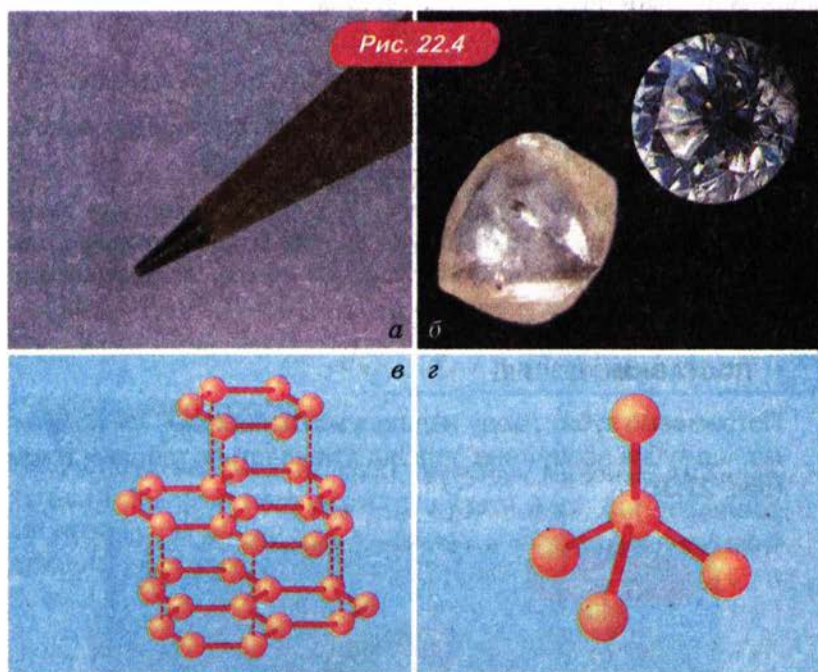
### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Потримаємо кубик льоду над полум'ям спиртівки. Ми побачимо, що кубик льоду тоне, але лід залишається твердим тілом (рис. 22.3).



**Залежність властивостей кристала від типу кристалічних ґраток.** Властивості кристала визначаються не тільки видом атомів, а й типом кристалічних ґраток. Пояснимо це на прикладі графіту та алмаза. Як не дивно, м'який чорний графіт і твердий прозорий алмаз складаються з тих самих атомів — атомів Карбону.

Кристалічні ґратки графіту мають шарувату структуру, причому ці шари слабко зв'язані один з одним, бо відстань між ними суттєво більша, ніж відстань між сусідніми атомами в одному шарі (рис. 22.4, а, в). Тому шари легко відокремлюються один від одного, чим і зумовлена м'якість графіту.



А в кристалічних ґратках алмаза кожний атом сильно зв'язаний зі своїми найближчими сусідами. Саме цим сильним зв'язком атомів і зумовлена унікальна твердість алмаза (рис. 22.4, б, в, г).

Вивчення властивостей кристалів дозволило досягти величезного прогресу в матеріалознавстві, електроніці, оптиці, медицині. Науково-технологічний концерн «Інститут монокристалів» НАН України (Харків) відомий своїми розробками в галузі вирощування та вивчення властивостей кристалів далеко за межами України. Штучні алмази виготовляють в Інституті надтвердих матеріалів НАН України (Київ).

### АМОРФНІ ТІЛА

Прикладами аморфних тіл є смола і скло.

В аморфних тілах зберігається порядок у розташуванні тільки найближчих «сусідів», тому говорять, що

в аморфних тілах існує «ближній порядок» у розташуванні атомів і молекул.

Через наявність тільки ближнього порядку атоми або молекули в аморфних тілах час від часу «перескакують» з одного положення в інше. Якщо на аморфне тіло діють зовнішні сили, «перескакування» молекул в одному напрямі відбувається частіше, ніж в інших. У результаті форма тіла поступово змінюється, тобто аморфні тіла мають плинність<sup>1</sup>.

Скло має плинність навіть за кімнатної температури, хоча і тече надзвичайно повільно: наприклад, шибки поступово товщають донизу, але це помітно тільки у вікнах дуже давніх будинків.

З підвищенням температури частота перескоків молекул чи атомів збільшується, і аморфне тіло, *поступово розм'якшуючись*, перетворюється в рідину. Таким чином, на відміну від кристалів,

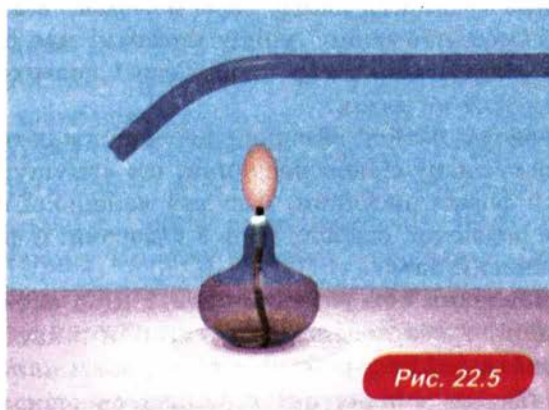
аморфні тіла не мають визначеної температури плавлення.

Наприклад, якщо скло нагріти, воно стає таким м'яким, що з нього можна ліпити. Ця властивість скла широко використовується в мистецтві та у складувальному виробництві — завдяки йому скляним виробам можна надавати практично будь-якої форми.



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Нагріваючи скляну паличку над полум'ям, ми побачимо, що скло поступово розм'якшується, але не тане (рис. 22.5).



<sup>1</sup> Тому такі тіла й названі аморфними: грецькою «аморфос» — не має форми.



## РІДИНИ

Будова рідин схожа з будовою аморфних тіл:

у розташуванні молекул у рідині існує тільки ближній порядок.

Відмінність рідин від аморфних тіл полягає переважно в тому, що рідини мають значно більшу плинність.

**Чому краплі круглі?** Те, що рідина «не має своєї форми», а завжди набуває форми посудини, не зовсім правильне: адже краплини рідини набувають не будь-якої, а саме *кулястої* форми (рис. 22.6). У стані невагомості (у космічному кораблі) форми кулі набуває будь-яка маса рідини.



Пояснення кулястої форми краплин полягає в тому, що рідина прагне зменшити площу своєї поверхні, а з усіх тіл із заданим об'ємом найменшу площу поверхні має саме куля. Намагання рідини зменшити площу своєї поверхні називають *поверхневим натягом*.

Поверхневому натягу зазвичай перешкоджають сила тяжіння та сила тиску стінок посудини, що «змушують» рідину набувати форми посудини. Але для маленької краплини, тим більше падаючої, основну роль в утворенні її форми відіграє поверхневий натяг.

**Чим зумовлений поверхневий натяг?** Щоб витягти молекулу з рідини, треба подолати притягання інших молекул, тобто виконати додатну роботу, а отже, *збільшити* енергію молекули. Таким чином, потенціальна енергія молекули, що перебуває поза рідиною, більша за потенціальну енергію молекули, що міститься в рідині.

Молекула в поверхневому шарі рідини взаємодіє з меншою кількістю сусідів, ніж молекула в товщі рідини, тобто ця молекула ніби «наполовину вирвана» з рідини (див. рис. 22.7). Отже, потенціальна енергія такої «поверхневої» молекули більша, ніж потенціальна енергія молекули в товщі рідини. А це означає, що молекули поверхневого шару мають надлишкову енергію порівняно з молекулами в товщі рідини. Цю енергію називають *поверхневою енергією*.

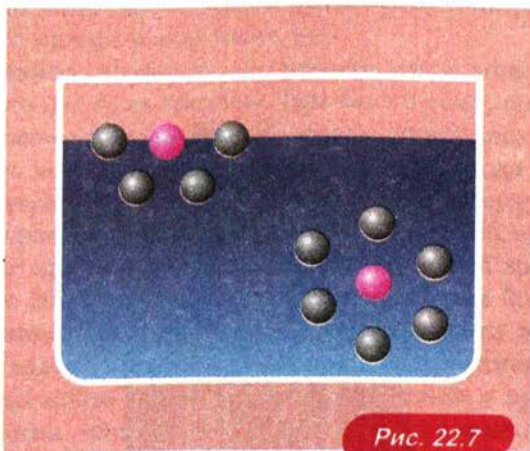


Рис. 22.7

Поверхнева енергія  $E_{\text{пов}}$  пропорційна площі  $S$  вільної поверхні рідини:  $E_{\text{пов}} = \sigma S$ . Величину  $\sigma$  називають *поверхневим натягом* даної рідини.

Саме завдяки прагненню зменшити поверхневу енергію рідина й прагне зменшити площу своєї поверхні.

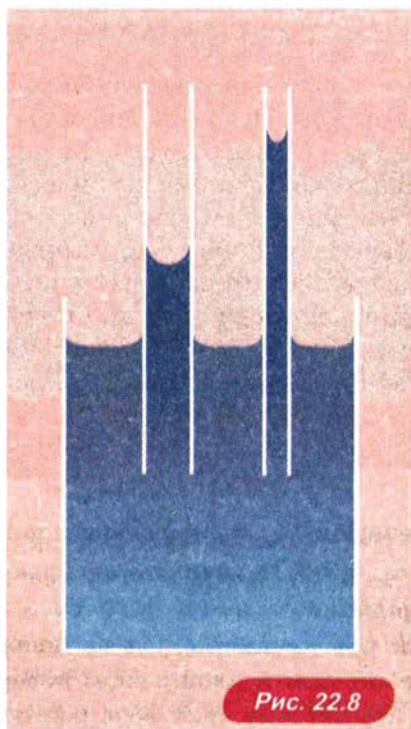
**Змочування.** По чистому склу вода розтікається, прагнучи збільшити площу дотику зі склом. Зумовлено це тим, що молекули води сильніше притягаються до скла, ніж одна до одної. У такому випадку говорять, що рідина *змочує* тверде тіло: у даному випадку вода змочує скло.

Ртуть же по склу не розтікається, бо молекули ртуті сильніше притягаються одна до одної, ніж до скла. Оскільки ртуть не змочує скло, пролита на скло ртуть збирається в круглі краплини, форма яких, як ми вже знаємо, визначається поверхневим натягом.

З тієї самої причини збирається в краплини й вода на покритій жиром поверхні: вода не змочує такі поверхні.

### КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

Унаслідок змочування вода піднімається по тонких скляних трубках, причому що менший внутрішній діаметр трубки, то вище піднімається вода (рис. 22.8). Тонкі трубки називають *капілярами*<sup>1</sup>, тому явище піднімання рідини в тонких трубках називають *капілярністю*.



Унаслідок капілярності вода піднімається по стеблах рослин і в пористих речовинах.

Якщо ж рідина не змочує поверхню трубки, то поверхня рідини в трубці буде нижчою від поверхні рідини в широкій посудині — так відбувається, наприклад, із ртуттю в скляній трубці.

<sup>1</sup> Від латинського слова «капіляріс» — волосяний і «капілус» — волос.



## ЯВИЩА ЗМОЧУВАННЯ ТА КАПІЛЯРНОСТІ В ПОБУТІ, ПРИРОДІ Й ТЕХНІЦІ

Коли ви витираєтеся рушником, він «збирає» воду з тіла завдяки тому, що тканина змочується водою, а між волокнами тканини є дрібні пори, куди «просочується» вода внаслідок капілярності. У природних тканин здатність усмоктувати воду набагато вища, ніж у синтетичних, тому що природні тканини краще змочуються водою й до того ж відстані між волокнами в цих тканин набагато менші, ніж у синтетичних. От чому краще носити одяг (особливо той, що безпосередньо прилягає до тіла), зроблений з природних тканин: ці тканини набагато краще всмоктують піт.

Ви, звичайно, помічали, що вимити посуд холодною водою важко, якщо їжа була жирною. Причина в тому, що жир практично не змочується холодною водою. Використання гарячої води істотно поліпшує справу, тому що гаряча вода змочує жир набагато краще. Ще більшого успіху в митті посуду можна досягти, використовуючи мийні засоби: у мильної води поверхневий натяг майже вдвічі менший, ніж у чистої води. Мильна вода змочує жир, прилипаючи до нього і несучи його із собою. Тому за допомогою мийних засобів можна мити посуд навіть холодною водою. Завдяки зменшенню поверхневого натягу мило та інші мийні засоби застосовують також у пранні.

Змочування використовують і в промисловості. Наприклад, для фарбування або паяння потрібно забезпечити якомога більше змочування. За допомогою змочування збагачують руди кольорових металів: деякі рідини змочують металеві хімічні сполуки, але не змочують порожню породу.

Іноді ж потрібно, навпаки, зменшити змочування. Так, фундамент будинку покривають спеціальними гідроізоляційними матеріалами (наприклад, смолою), які не змочуються водою. Ці матеріали ізолюють будинок від ґрунтової вологи, яка інакше піднімалася б по порах цеглин, які змочуються водою.

Малим змочуванням «користуються» й водоплавні птахи та звірі: їхнє пір'я або хутро покрите жиром, який не змочується водою. Завдяки цьому білі ведмеді плавають у крижаній воді, після чого вилазять з неї практично сухими. Тож «вийти сухим із води» насправді можна: це кожний день роблять гусаки та білі ведмеді.

Капілярність використовують рослини: зокрема, завдяки капілярності ґрунтові води піднімаються по стеблах рослин.

## РІДКІ КРИСТАЛИ

У другій половині 20-го століття почали активно вивчати речовини, у яких в одному напрямі існує далекий порядок у розташуванні молекул, а у двох інших напрямках — тільки ближній. Ці речовини поєднують властивості рідин і кристалів, тому їх називали *рідкими кристалами*.

Рідкі кристали дуже чутливі до зміни зовнішніх умов. Наприклад, навіть унаслідок невеликої зміни температури, тиску, електричного чи магнітного полів вони можуть змінювати колір.

Цю властивість рідких кристалів використовують у різних приладах, наприклад у рідкокристалічних медичних термометрах. Особливо широко застосовують рідкі кристали для виготовлення дисплеїв — від малих годинників та мобільних телефонів до великих комп'ютерів та телевізорів.

## 3. ІНШІ СТАНИ РЕЧОВИНИ

### ПЛАЗМА

За температури в тисячі і мільйони градусів швидкість хаотичного руху атомів стає такою великою, що електронні оболонки атомів повністю або частково руйнуються внаслідок зіткнень. У результаті утворюються заряджені частинки — йони та вільні електрони. Такий дуже йонізований газ називають плазмою.

У земних умовах плазма — порівняно рідкий стан речовини: безпосередньо ми спостерігаємо плазму тільки у вигляді блискавки. Однак у космічних масштабах плазма є дуже поширеним станом речовини: у цьому стані перебуває, наприклад, більшість зір (у тому числі й наше Сонце).

### ПОЛІМЕРИ ТА РЕЧОВИНИ

#### З НАПЕРЕД ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Молекули деяких речовин — наприклад, молекули, які входять до складу живих організмів, а також молекули багатьох пластмас — складаються з дуже великої кількості однакових або різних атомних груп, що чергуються, — ланок, з'єднаних між собою хімічними зв'язками в довгі лінійні, розгалужені і навіть просторові тривимірні структури. Такі речовини називають *полімерами*.



До полімерів належать численні природні сполуки, наприклад білки та нуклеїнові кислоти. Велику кількість полімерів одержують сьогодні штучно (синтетичним шляхом).

Завдяки цінним властивостям природні та штучні полімери застосовують у машинобудуванні, текстильній промисловості, сільському господарстві та медицині, автомобільній суднобудуванні, у побуті (текстильні та шкіряні вироби, посуд, клей і лаки, прикраси та інші предмети). На основі полімерів виготовляють гуми, волокна, пластмаси, плівки та лакофарбові покриття.

Всесвітньо відомим науковим центром дослідження і розробки полімерних матеріалів для багатьох галузей промисловості є Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України (Київ).

Штучні полімери — приклад речовин з наперед заданими властивостями. Сьогодні вчені вміють одержувати й інші речовини з наперед заданими властивостями, наприклад напівпровідники, які широко використовують у комп'ютерах та мобільних телефонах.

## МОЛЕКУЛЯРНА БУДОВА ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

Жива матерія на молекулярному рівні відрізняється від неживої виключно високим ступенем упорядкованості.

Наприклад, молекули нуклеїнових кислот, що несуть спадкову інформацію, містять мільйони атомів, які розташовано у чітко визначеному порядку. Ці молекули утворюють подвійні спіралі у вигляді дуже довгих ланцюгів. Так, загальна довжина всіх молекул нуклеїнових кислот, що містяться в організмі *однієї* людини, більш ніж у 100 разів перевищує відстань від Землі до Сонця (от де мікросвіт «зникається» з космосом!).

Щоб уміститися в ядрі клітини, молекула нуклеїнової кислоти надзвичайно щільно упаковується — на ній утворюються тисячі петель, перегинів тощо. Однак навіть будучи так щільно упакованою, молекула нуклеїнової кислоти постійно займається надзвичайно складною діяльністю — побудовою так само високовпорядкованих величезних молекул білків<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Одним з перших учених, які почали вивчати властивості білків, був уже знайомий нам Гей-Люссак, ім'ям якого названо закон теплового розширення газу під час ізобарного процесу.



Злагоджене функціонування біологічних молекул не може бути описане тими самими засобами, якими описується будова речовини неживій матерії. Однак фізика і біологія, об'єднавшись, створили нову науку — біофізику. Ця наука вивчає будову живих організмів, використовуючи методи фізики, біології, хімії та інформатики.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- У кристалах атоми або молекули розташовані упорядковано, утворюючи кристалічні ґратки; кристали плавляться за певної температури, що називають температурою плавлення.
- В аморфних тілах є тільки «ближній порядок» у розташуванні атомів і молекул; аморфні тіла мають плинність; аморфні тіла не мають певної температури плавлення.
- У розташуванні молекул рідини існує тільки «ближній порядок».



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Що спільного у твердих тіл та рідин? Чим вони відрізняються?
2. Що спільного у рідин та газів? Чим вони відрізняються?
3. Як розташовані молекули і атоми в газах, рідинах та кристалічних тілах?
4. Яка особливість плавлення кристалічних тіл?
5. Що таке аморфні тіла? Наведіть приклади аморфних тіл.
6. Чи плавляться аморфні тіла?
7. У чому полягає явище змочування?
8. Наведіть приклади капілярних явищ.

#### Другий рівень

9. Чи може та сама речовина перебувати одночасно в різних агрегатних станах? Наведіть приклади, що підтверджують вашу відповідь.
10. Чому властивості всіх газів майже однакові, а властивості рідин і твердих тіл такі різні?
11. Оцініть, який об'єм припадає в середньому на одну молекулу в повітрі, що вас оточує: для цього можна, наприклад, об'єм повітря в кімнаті розділити на кількість молекул у ньому. У скільки разів цей об'єм більший за об'єм самої молекули? Для оцінки прийміть, що густина повітря дорівнює  $1,3 \text{ кг/м}^3$ . Молярну масу повітря вважайте рівною  $0,029 \text{ кг/моль}$ .

12. Що таке далекий порядок і ближній порядок? Для яких станів речовини характерний далекий порядок, а для яких — ближній?
13. Що «змушує» атоми в кристалах розташовуватися впорядковано?
14. Є зразок твердого тіла. За допомогою яких дослідів можна визначити, кристалічне це тіло чи аморфне?
15. Які особливості плазми?
16. Що таке полімери? Яка головна особливість їх будови?
17. Які особливості молекулярної будови живих організмів?
18. Складіть задачу за темою «Стани речовини», відповіддю якої було б «Тільки кристалічні».

## § 23. ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ

---

### 1. Плавлення та кристалізація

### 2. Випаровування та конденсація

#### 1. ПЛАВЛЕННЯ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЯ

Перехід речовини із кристалічного стану в рідинний називають *плавленням*.

Зворотний процес, коли речовина переходить з рідинного стану в кристалічний, називають *кристалізацією* або *твердненням*.

**Температура плавлення.** Досліди свідчать, що температура тіла протягом процесу плавлення залишається сталою. Цю температуру називають *температурою плавлення*.

Саме завдяки сталості температури протягом процесу плавлення температуру танення льоду (або температуру кристалізації води, що те ж саме) і вибрали однією з реперних точок температурної шкали Цельсія.

Температури плавлення різних речовин можуть відрізнятися на тисячі градусів.

#### Приклади

Як відомо, вода замерзає, а лід тоне за температури  $0^{\circ}\text{C}$ .

Дуже низькі температури плавлення у речовин, які ми звикли вважати газами: наприклад, водень плавиться за температури  $-259^{\circ}\text{C}$ , а кисень — за температури  $-218^{\circ}\text{C}$ .

Залізо плавиться за температури  $1539^{\circ}\text{C}$ , а найбільш тугоплавкий метал — вольфрам — має температуру плавлення  $3387^{\circ}\text{C}$ . Однак є метал, що перебуває в рідинному стані навіть за кімнатної температури, — це ртуть (температура її плавлення дорівнює  $-39^{\circ}\text{C}$ ).

#### 2. ВИПАРОВУВАННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ

##### ВИПАРОВУВАННЯ

Процес перетворення рідини в пару називають *пароутворенням*.



Якщо пароутворення відбувається з вільної поверхні рідини, його називають *випаровуванням*.

Випаровування відбувається за будь-якої температури: наприклад, вода поступово «звітрюється» з відкритої посудини, а калюжі після дощу висихають.

**Чи можуть випаровуватися тверді тіла?** Як відомо, білизна, що замерзла на морозі, висихає: лід випаровується, тобто перетворюється в пару, минаючи рідкий стан (воду). Можна помітити також, як із твердого стану в газоподібний переходить йод: жовта пляма від йоду світлішає і згодом зникає.

Однак лід та йод не є винятками: досліди показують, що випаровуються усі тверді тіла, але більшість із них випаровуються так повільно, що ми цього не помічаємо.

**Чому рідина під час випаровування охолоджується?** Під час випаровування з рідини вилітають найбільш швидкі молекули: їхня кінетична енергія достатня, щоб вирватися з рідини, незважаючи на притягання решти молекул. Унаслідок цього *середня* кінетична енергія молекул, що залишилися, зменшується. А оскільки температура пропорційна середній кінетичній енергії молекул, то рідина під час випаровування охолоджується.

Що швидше випаровується рідина, то сильніше вона охолоджується. Потріть руку ваткою, змоченою у воді, а потім — ваткою, змоченою в одеколоні: у другому випадку відчуття прохолоди буде сильніше, бо одеколон випаровується швидше, ніж вода.

Усім знайоме відчуття прохолоди після виходу з річки або моря. Якщо дме вітерець, відчуття прохолоди підсилюється, оскільки випаровування відбувається швидше.

## НАСИЧЕНА І НЕНАСИЧЕНА ПАРА

**Динамічна рівновага.** Добре відомо: якщо посудина з рідиною щільно закрита, рівень рідини в посудині залишається незмінним. Чи означає це, що процес випаровування в закритій посудині не відбувається?

Ні, не означає: адже в рідині, як і раніше, є «швидкі» молекули, що безперестанно вилітають з неї.

Але річ у тім, що одночасно з випаровуванням завжди відбувається і протилежний процес — конденсація: з пари, що є над поверхнею рідини, молекули влітають назад у рідину.

Якщо рівень рідини згодом не змінюється, це означає, що процеси випаровування та конденсації відбуваються з *однаковою швидкістю*: щосекунди з рідини вилітає в середньому стільки ж молекул, скільки і влітає в рідину.

У такому разі говорять, що рідина і пара перебувають у *динамічній рівновазі*.

**Насичена пара.** Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають *насиченою парою*. На рисунку 23.1 схематично зображено процеси випаровування та конденсації у випадку насиченої пари.



Саме насичена пара і міститься над поверхнею рідини в щільно закритій посудині — тому рівень рідини в посудині залишається постійним.

**Ненасичена пара.** Якщо посудину з рідиною відкрити, пара почне виходити назовні. Її концентрація в посудині зменшиться, і внаслідок цього молекули пари влітатимуть у рідину рідше, тобто процес конденсації сповільниться. А оскільки процес випаровування продовжує відбуватися з тією самою швидкістю, рівень рідини в посудині почне знижуватися.

Якщо процес випаровування проходить швидше, ніж процес конденсації, говорять, що над рідиною знаходиться *ненасичена пара*. На рисунку 23.2 схематично зображено проце-

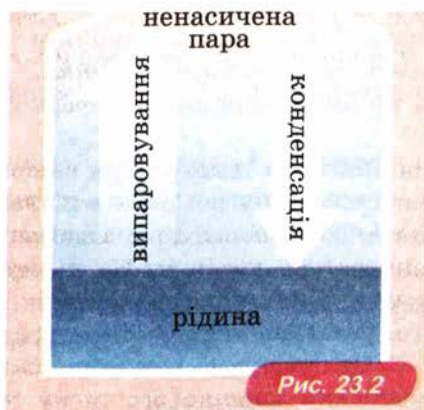


Рис. 23.2

си випаровування і конденсації у випадку ненасиченої пари. Зверніть увагу на відмінність цього рисунку від рис. 23.2.

Над морями й океанами знаходиться зазвичай ненасичена пара, тобто випаровування йде інтенсивніше, ніж конденсація. Пара, що піднімається вгору, охолоджується й конденсується, утворюючи хмари, які уносяться вітром та згодом проливаються дощами.

Якщо дощ ллє на сушу, то річки та підземні води потім несуть воду назад — у моря та океани.

**Кипіння.** У рідині завжди є маленькі бульбашки повітря. Рідина випаровується усередину цих бульбашок, у результаті чого пара всередині бульбашок стає насиченою. Якщо тиск насиченої пари менший від тиску всередині рідини (для неглибоких посудин він практично дорівнює атмосферному), ці бульбашки не зможуть рости, тобто пароутворення відбудеться тільки з вільної поверхні рідини.

Однак тиск насиченої пари швидко збільшується з підвищенням температури: адже що вища температура, то більшою є середня кінетична енергія молекул, а отже, більша їх частина може вирватися з рідини, подолавши притягання решти молекул. Якщо нагрівати рідину, то за певної температури тиск насиченої пари зрівняється з тиском у рідині (приблизно рівним атмосферному) і почнеться інтенсивне випаровування рідини всередину бульбашок. Наповнюючись паром, бульбашки швидко зростатимуть, здійматимуться під



дією архімедової сили та лопатимуться на поверхні рідини. Ця картина усім добре знайома — йдеться про *кипіння*.

Отже, кипіння рідини відбувається за температури, коли тиск насиченої пари зрівнюється із зовнішнім тиском. Цю температуру називають *температурою кипіння*.

Температура кипіння води за атмосферного тиску дорівнює  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Чи може вода кипіти за температури вищої чи нижчої від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Оскільки тиск насиченої пари з підвищенням температури збільшується, то, збільшуючи зовнішній тиск, можна збільшити й температуру кипіння. На цьому заснована дія кастрель-скороварок: у них утворюється тиск, удвічі більший від атмосферного, унаслідок чого температура кипіння підвищується до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Це прискорює готування їжі в кілька разів.

У разі ж зменшення зовнішнього тиску температура кипіння знижується. Наприклад, у горах, де тиск менший, ніж на рівні моря, вода кипить за температури нижче  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : на висоті 5 км — за температури  $83\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так що зварити м'ясо в горах непросто.



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Доведемо воду в колбі до кипіння та щільно закриємо колбу. Коли вода трохи остигне, перевернемо колбу й почнемо поливати дно колби холодною водою. Вода в колбі закипить, хоча її температура істотно нижча від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 23.3). Річ у тім, що під час охолодження водяна пара над поверхнею води сконденсувалася, у результаті чого тиск у колбі різко впав. А за зниженого тиску вода кипить за температури нижче  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 23.3

## ВОЛОГІСТЬ

Вміст водяної пари в повітрі характеризують тиском, який створювала б ця пара, якби інших газів не було.

Наприклад, тиск насиченої водяної пари за кімнатної температури становить близько 2 % від звичайного атмосферного тиску.

Тиск ненасиченої пари менший, ніж тиск насиченої. Тому ступінь «насиченості» водяної пари можна визначити як відношення тиску водяної пари до тиску насиченої пари за тієї самої температури.

Цю величину, виражену у відсотках, називають відносною вологістю і позначають  $\varphi$ . Отже,

відносна вологість  $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$ , де  $p$  — тиск водяної пари за даної температури,  $p_n$  — тиск насиченої пари за тієї самої температури.

Комфортна для людини вологість повітря близько 50–60 %.

Вологість повітря вимірюють за допомогою приладів, один з яких називають *психрометром* (див. лабораторну роботу № 9). Психрометр складається з двох термометрів: сухого і вологого. Через випаровування води вологий термометр показує більш низьку температуру, ніж сухий, причому чим нижча відносна вологість, тим більша різниця показів термометрів. На основі показів цих двох термометрів за допомогою так званої психометричної таблиці визначають відносну вологість повітря.

**Чому роса випадає рано-вранці?** Тиск насиченої пари  $p_n$  зменшується, коли знижується температура повітря. Тому відповідно до формули  $\varphi = (p/p_n) \cdot 100\%$  за однакового тиску водяної пари  $p$  його відносна вологість збільшується і за деякої температури може дорівнювати 100 %. За цієї температури, що називають *точкою роси*, починається конденсація водяної пари, тобто випадає роса.

Найхолодніший час доби — рано-вранці. От чому роса випадає до сходу сонця. І літнього ранку ми милуємося крапельками роси, що іскряться на траві, а зимового — деревами, вдягненими в мережива інею (іній — це замерзла роса).

- Перехід речовини з кристалічного стану в рідкий називають плавленням. Зворотний процес, коли речовина переходить з рідкого стану в кристалічний, називають кристалізацією.
- Процес перетворення рідини в пару називають пароутворенням.
- Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають насиченою парою.
- Кипіння рідини відбувається за температури, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску. Цю температуру називають температурою кипіння. Температура кипіння води за атмосферного тиску дорівнює  $100^{\circ}\text{C}$ .
- Відносною вологістю  $\varphi$  повітря називають відношення тиску  $p$  водяної пари за даної температури до тиску  $p_{\text{н}}$  насиченої пари за тієї самої температури, виражене у відсотках:  $\varphi = (p/p_{\text{н}}) \cdot 100\%$ .



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Що таке фазові переходи? Наведіть приклади фазових переходів.
2. Що таке плавлення і кристалізація? Що спільного в цих процесах?
3. Як змінюється внутрішня енергія тіла під час плавлення?
4. Що таке випаровування і конденсація? Що спільного в цих процесах і чим вони відрізняються?
5. Що спільного у плавлення і випаровування та чим вони відрізняються?
6. Чому рідина унаслідок випаровування охолоджується?
7. Яка температура кипіння води за нормального атмосферного тиску?
8. Що таке відносна вологість?

#### Другий рівень

9. Чому для випаровування рідини за постійної температури до рідини треба постійно підводити тепло?
10. Що таке кипіння? Чим воно відрізняється від випаровування? Що спільного в цих процесах?



11. Чому крапля води, потрапивши на розжарену сковороду, не випаровується відразу, а починає підстрибувати?
12. Чи може вода кипіти за температури, відмінній від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
13. Що таке насичена пара? Чим вона відрізняється від ненасиченої?
14. Яка відносна вологість повітря за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коли тиск водяної пари дорівнює  $840\text{ Па}$ , якщо тиск насиченої водяної пари за цієї температури дорівнює  $2,33\text{ кПа}$ ?
15. Чи впливає вітер на покази мокрого термометра? сухого? Термометри розміщено в тіні.
16. Чому роса випадає рано-вранці?
17. Чому шибка запітніває, якщо на неї подихати?
18. Складіть задачу за темою «Фазові переходи», відповіддю якої було б «Потрібно  $460\text{ кДж}$ ».

- Усі речовини складаються з дрібних частинок, що перебувають у безперестанному хаотичному русі та взаємодіють одна з одною.
- Величини, що характеризують стан макроскопічних тіл у цілому, називають *макроскопічними* параметрами. Основні макроскопічні параметри — тиск, об'єм і температура.
- Величини, що характеризують властивості окремих молекул речовини, називають *мікроскопічними* параметрами. Приклади мікроскопічних параметрів — маса молекули та її середня кінетична енергія.
- *Рівнянням стану* називають співвідношення між макроскопічними параметрами (температурою, об'ємом і тиском).
- *Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії* — вивести рівняння стану речовини, установивши зв'язок між макроскопічними та мікроскопічними параметрами.
- *Атомна одиниця маси* (а.о.м.) дорівнює  $1/12$  маси атома Карбону. *Відносна молекулярна маса*  $M_r$  дорівнює масі молекули, вираженої в атомних одиницях маси.
- *Один моль* — це кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів Карбону міститься в 12 г вуглецю. Кількість речовини в молях позначається  $\nu$ .
- *Сталою Авогадро* називають кількість молекул в одному молі:  $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  1/моль. Кількість молекул у тілі  $N = \nu N_A$ .
- *Молярна маса*  $M$  дорівнює масі одного моля. Маса тіла  $m$  пов'язана з молярною масою співвідношенням  $m = M\nu$ .
- *Температура* характеризує стан теплової рівноваги: тіла, що перебувають у тепловій рівновазі, мають однакову температуру.
- *Абсолютною температурою* називають температуру за абсолютною шкалою температур (шкалою Кельвіна), а нуль за цією шкалою — *абсолютним нулем температури*. Він відповідає  $t = -273^\circ\text{C}$  за шкалою Цельсія. Абсолютну температуру позначають  $T$ .
- Абсолютна температура  $T$  і температура  $t$  за шкалою Цельсія пов'язані співвідношенням:  $T = t + 273$ .
- *Ідеальний газ* — модель газу, розмірами молекул якого можна знехтувати, а взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

- *Ізопроцеси*: для даної маси газу  $\frac{V}{T} = \text{const}$  за умови  $p = \text{const}$  (*ізобарний* процес);  $\frac{p}{T} = \text{const}$  за умови  $V = \text{const}$  (*ізохорний* процес);  $pV = \text{const}$  за умови  $T = \text{const}$  (*ізотерічний* процес).
- *Рівняння Клапейрона*:  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ .
- *Закон Авогадро*: за однакових температури і тиску в рівних об'ємах різних газів міститься однакова кількість молекул.
- Наслідками рівняння Клапейрона і закону Авогадро є співвідношення  $\frac{pV}{T} = kN$  і  $p = nkT$ , де  $k$  — стала Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/моль·К.
- *Рівняння Менделєєва—Клапейрона*:  $pV = \frac{m}{M} RT$ , де  $m$  — маса газу,  $M$  — його молярна маса. Універсальна газова стала  $R = 8,31$  Дж/моль·К.
- У *кристалах* атоми або молекули розташовані упорядковано, утворюючи *кристалічні ґратки*; кристали плавляться за певної температури, що називають *температурою плавлення*.
- В *аморфних* тілах є тільки «ближній порядок» у розташуванні атомів і молекул; аморфні тіла мають *плинність* і не мають певної температури плавлення.
- У розташуванні молекул у рідині існує тільки «ближній порядок».
- Перехід речовини з кристалічного стану в рідкий називають *плавленням*. Зворотний процес, коли речовина переходить з рідкого стану в кристалічний, називають *кристалізацією*.
- Процес перетворення рідини в пару називають *пароутворенням*.
- Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають *насиченою парою*.
- Кипіння рідини відбувається за температури, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску. Цю температуру називають *температурою кипіння*. Температура кипіння води за атмосферного тиску дорівнює  $100^\circ \text{C}$ .
- Відносною вологістю  $\phi$  повітря називають відношення тиску  $p$  водяної пари за даної температури до тиску  $p_n$  насиченої пари за тієї самої температури, виражене у відсотках:  $\phi = (p/p_n) \cdot 100\%$ .



# 5 ТЕРМОДИНАМІКА

---

## **§ 24. Внутрішня енергія.**

**Перший закон термодинаміки**

## **§ 25. Теплові двигуни,**

**холодильники та кондиціонери**

## **§ 26. Необоротність теплових процесів.**

**Охорона навколишнього середовища**

## § 24. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

---

1. Внутрішня енергія
2. Закон збереження енергії в теплових явищах

### 1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ

Енергія хаотичного руху молекул є лише малою часткою всієї енергії, яка міститься в тілі.

Річ у тім, що атоми і молекули не тільки рухаються, а й *взаємодіють* між собою, тобто мають не тільки кінетичну, а й *потенціальну енергію*.

Суму кінетичної енергії хаотичного руху всіх частинок, що входять до складу даного тіла, і потенціальної енергії їх взаємодії називають *внутрішньою енергією*.

#### У ЯКИХ ПРОЦЕСАХ І ЯК МОЖЕ ЗМІНЮВАТИСЯ ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ?

*Під час зміни температури тіла* змінюється кінетична енергія хаотичного руху атомів і молекул, а також потенціальна енергія взаємодії атомів і молекул (наприклад, через зміну об'єму тіл, а отже, і відстані між молекулами).

*Під час хімічних реакцій* (наприклад, горіння або вибуху) та *зміни агрегатного стану речовини* (наприклад, під час переходу з рідкого стану у твердий чи газоподібний) змінюється потенціальна енергія атомів, що входять до складу молекул.

*Під час ядерних реакцій* змінюється потенціальна енергія частинок, що входять до складу атомного ядра.

Розглянемо приклади, що допоможуть вам уявити «масштаби» змін внутрішньої енергії.

## ПРИКЛАДИ ЗМІН ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

У чому виявляється зміна внутрішньої енергії	Приклад механічного еквівалента
<i>Нагрівання та охолодження</i>	
Унаслідок зміни температури змінюється кінетична енергія хаотичного руху молекул, а в рідині та твердому тілі — також і потенціальна енергія взаємодії молекул.	Щоб нагріти від кімнатної температури до температури кипіння 1 літр води, треба затратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на дванадцять поверхів (рис. 24.1). Така сама енергія виділяється у результаті охолодження 1 л води від температури кипіння до кімнатної температури.
<i>Плавлення і кристалізація</i>	
Під час руйнування або утворення кристалічних ґраток змінюється потенціальна енергія взаємодії атомів чи молекул.	Щоб розплавити 1 кг льоду, треба затратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на дванадцять поверхів. Така сама енергія виділяється у результаті кристалізації 1 л води.
<i>Випаровування і конденсація</i>	
Під час розриву або утворення зв'язків між молекулами змінюється потенціальна енергія їхньої взаємодії.	Щоб випарувати 1 кг води, треба затратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на 70 поверхів. Така сама енергія виділяється у результаті конденсації 1 кг водяної пари.
<i>Хімічні реакції, що проходять з виділенням тепла</i>	
Під час перебудови молекул відбувається перетворення потенціальної енергії взаємодії атомів у кінетичну енергію хаотичного руху молекул.	Унаслідок згоряння 1 кг бензину виділяється стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на гору заввишки 4,5 км.
<i>Ядерні реакції</i>	
Під час поділу або синтезу (об'єднання) атомних ядер відбувається перетворення потенціальної енергії взаємодії частинок, що входять до складу атомного ядра, у кінетичну енергію хаотичного руху частинок і енергію випромінювання.	За поділу ядер у 1 кг урану виділяється енергія, достатня для «закидання» навантаженого потягу із Землі на Місяць.





Рис. 24.1

На рисунку 24.2 схематично (без дотримання масштабу) показане співвідношення між різними видами енергії, що містяться в тілі. Ми бачимо, що механічна енергія, яку ми спостерігаємо безпосередньо, — лише дуже мала частина всієї енергії, що містить тіло.

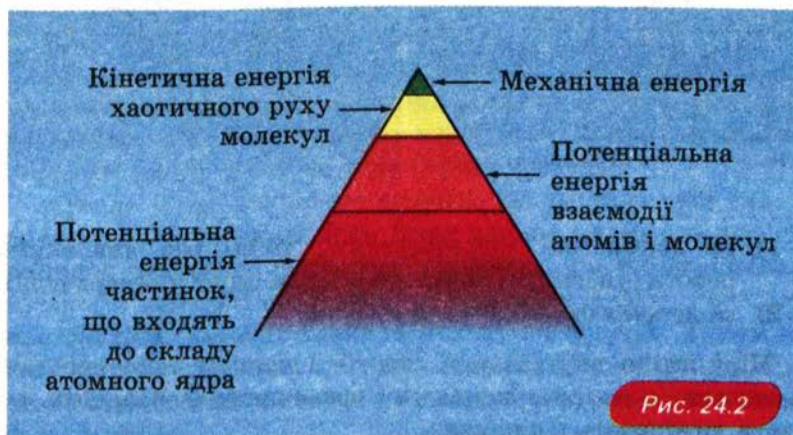


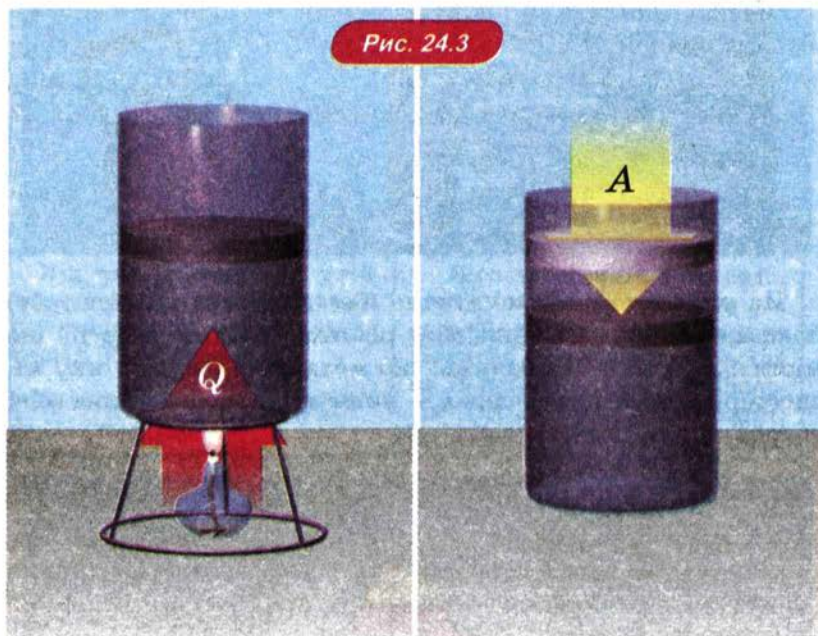
Рис. 24.2

У цьому розділі ми розглядатимемо тільки верхні три «поверхи» зображеної «піраміди енергій», і тому під «внутрішньою енергією» будемо розуміти тільки кінетичну енергію хаотичного руху молекул і потенціальну енергію їхньої взаємодії. Ядерні реакції ми розглянемо в курсі фізики 11-го класу.

## 2. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВИХ ЯВИЩАХ

### СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

З курсу фізики попередніх класів ви знаєте, що внутрішню енергію тіла можна змінити двома способами (рис. 24.3):



- 1) за допомогою *теплопередачі*, тобто без виконання роботи (унаслідок контакту з тілом іншої температури);
- 2) за допомогою *виконання роботи*.

Міру зміни внутрішньої енергії в процесі теплопередачі називають *кількістю теплоти* і позначають  $Q$ . Кількість теплоти вимірюють у джоулях.



## ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Позначимо зміну внутрішньої енергії тіла  $\Delta U$ , а роботу, виконану над цим тілом, позначимо  $A$ . Відповідно до закону збереження енергії

зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює сумі кількості теплоти, переданого тілу, і роботи, виконаної над тілом:  
$$\Delta U = Q + A.$$

Закон збереження енергії для теплових явищ називають *першим законом термодинаміки*.

Часто використовують і таке формулювання першого закону термодинаміки, у якому отримана тілом кількість теплоти виражається через зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану тілом.

Позначимо цю роботу  $A_r$ , оскільки в теплових двигунах роботу виконує газ. Робота  $A_r$  пов'язана з роботою  $A$ , виконаною над тілом, співвідношенням  $A_r = -A$ . Тоді перший закон термодинаміки можна сформулювати так:

кількість теплоти, передана тілу, дорівнює сумі зміни внутрішньої енергії тіла і роботи, виконаної тілом:  
$$Q = \Delta U + A_r.$$

Приклади застосування першого закону термодинаміки до різних газових процесів розглянуто далі.

**Хто відкрив перший закон термодинаміки?** Перший закон термодинаміки є одним з формулювань закону збереження енергії, відкритого, як ви вже знаєте, Майєром, Джоулем і Гельмгольцем (див. § 19. Енергія. Закон збереження механічної енергії).

Згадаємо тут також французького вченого Карно, твір якого «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу» відіграв велику роль у розвитку термодинаміки. От що він писав (при цитуванні його роботи ми використовуємо сучасну наукову термінологію):

«Тепло — це механічна енергія, що змінила свій вид: це енергія руху частинок тіла. Коли зникає механічна енергія, виникає одночасно теплота в кількості, що точно дорівнює кількості зниклої механічної енергії. І, навпаки, коли зникає теплота, завжди виникає механічна енергія. Таким чином, енергія існує в природі в незмінній кількості; вона ніколи не створюється і ніколи не знищується, змінюючи тільки свою форму».



## ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРШОГО ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМІКИ

**Ізохорний процес.** Якщо газ нагрівається чи охолоджується за незмінного об'єму (наприклад, у товстостінному металевому балоні), він не рухає поршень, тобто не виконує роботу. Отже, внутрішня енергія газу змінюється тільки завдяки теплопередачі. З першого закону термодинаміки випливає, що в цьому випадку  $\Delta U = Q$ .

**Ізотермічний процес.** Внутрішня енергія газу залежить тільки від температури і тому під час ізотермічного процесу не змінюється, тобто  $\Delta U = 0$ . Тому з першого закону термодинаміки випливає, що під час ізотермічного процесу  $Q = A$ .

Якщо газ розширяється, він виконує додатну роботу, яка дорівнює, як ми бачимо, кількості теплоти, яку він одержує (через стінки посудини).



Рис. 24.4

**Адіабатний процес.** Ви, можливо, помічали, що під час накачування велосипедної камери насос нагрівається. Відбувається це головним чином тому, що, стискаючи газ, ми виконуємо над ним роботу, збільшуючи його внутрішню енергію а отже, і температуру. Це використовують у дизельних двигунах: повітря за дуже швидкого стискання в циліндрі двигуна нагрівається так, що пальна суміш у ньому може загорітися (рис. 24.4).

Унаслідок розширення ж газу в теплоізолюваній посудині його температура знижується: цього разу роботу виконує газ, і тому його внутрішня енергія зменшується. Ось чому газувана вода, у якій розширюються бульбашки газу, прохолодніша за повітря.

Утворення хмар також зумовлене охолодженням газу під час розширення. Нагріте від поверхні Землі повітря, піднімаючись, розширюється (оскільки тиск повітря зі збільшенням висоти зменшується) і внаслідок цього охолоджується. Унаслідок охолодження водяна пара, що міститься в повітрі, конденсується, перетворюючись у малесенькі крапельки води.

У наведених прикладах теплопередача мала — чи тому, що посудина з газом теплоізолювана, чи тому, що процес відбувається настільки швидко, що теплообмін з навколишнім середовищем не встигає відбутися. Процес, що відбувається без теплопередачі, називають *адіабатним*.

Для адіабатного процесу  $Q = 0$ , тому з першого закону термодинаміки випливає, що  $A_r = -\Delta U$ , тобто газ виконує роботу тільки за рахунок зміни своєї внутрішньої енергії.

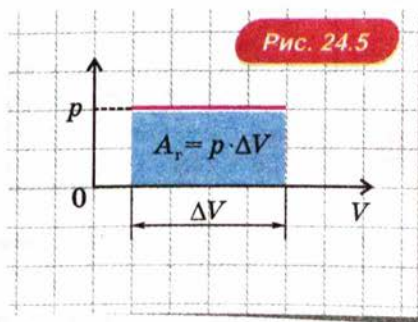
**Ізобарний процес.** Розширяючись, газ виконує роботу, тобто  $A_r > 0$ . Згідно із законом Гей-Люссака під час ізобарного розширення температура газу збільшується, а отже, збільшується і його внутрішня енергія, тобто  $\Delta U > 0$ . Тоді з першого закону термодинаміки, записаного у вигляді  $Q = \Delta U + A_r$ , випливає, що  $Q > 0$ , тобто газ може розширюватися ізобарно тільки за умови, що йому надають певну кількість теплоти.

## ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧІ

1. Доведемо, що за ізобарного розширення робота газу  $A_r = p \cdot \Delta V$ , де  $p$  — тиск газу,  $\Delta V$  — зміна його об'єму.

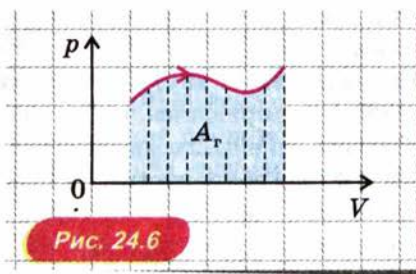
**Розв'язання.** За ізобарного розширення газ тисне на поршень з постійною силою  $F = pS$ , де  $S$  — площа поршня. Виконана газом робота  $A_r = F \cdot \Delta h = pS \cdot \Delta h$ , де  $\Delta h$  — переміщення поршня. Оскільки  $S \cdot \Delta h = \Delta V$ , отримуємо  $A_r = p \cdot \Delta V$ .

Зауважимо тепер, що вираз  $p \cdot \Delta V$  чисельно дорівнює площі фігури під графіком ізобари в координатах  $p(V)$  (рис. 24.5).

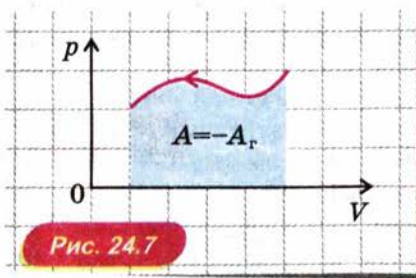


2. Доведемо, що робота, виконана газом під час розширення, чисельно дорівнює площі під графіком залежності тиску газу від його об'єму, тобто площі під графіком  $p(V)$ . Визначимо роботу, виконану над газом під час його стискування.

**Розв'язання.** Розглянемо розширення газу, за якого його тиск змінюється, — на рисунку 24.6 показано приклад графіка залежності  $p(V)$  для такого процесу.



Увесь процес розширення газу можна подумки розбити на багато етапів, у кожному з яких об'єм газу змінюється настільки мало, що протягом кожного етапу тиск газу можна вважати практично постійним. Тоді для кожного етапу робота газу чисельно дорівнює площі під відповідною ділянкою графіка (див. попередню задачу). Отже, уся робота, виконана газом під час розширення, дорівнює площі під усім графіком  $p(V)$ . Доведення закінчено. Якщо відбувається не розширення, а стискування газу, він виконує *від'ємну* роботу, що дорівнює за модулем площі під графіком  $p(V)$  (рис. 24.7).



Виконана *над газом* робота  $A = -A_r$ , при цьому додатна і дорівнює площі під графіком  $p(V)$ .

- Газ здійснює циклічний процес, тобто повертається до свого початкового стану (рис. 24.8). Доведемо, що робота  $A_r$ , виконана газом у цьому процесі, чисельно дорівнює площі, обмеженої графіком цикла в координатах  $p, V$ .

**Розв'язання.** Проведемо ізохори  $a$  і  $b$ , що відповідають найменшому і найбільшому об'єму газу в циклічному процесі (рис. 24.9). Тоді циклічний процес можна уявити як послідовність процесів розширення (1) і стиснення (2). У процесі 1 газ виконує додатну роботу, що чисельно дорівнює площі під кривою 1, а в процесі 2 — від'ємну роботу, модуль якої чисельно



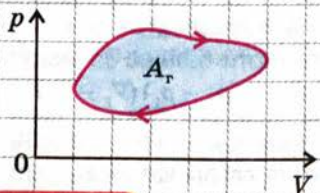


Рис. 24.8

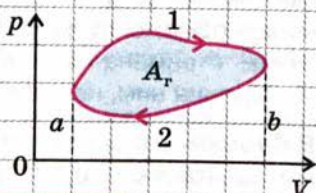


Рис. 24.9

дорівнює площі під кривою 2. Тому робота газу за весь цикл чисельно дорівнює різниці площі під кривою 1 та під кривою 2, тобто площі, обмеженої графіком циклу.

4. Дана маса газу здійснює циклічний процес  $a - b - c - d - a$ , який складається з двох ізобар і двох ізохор (рис. 24.10). На яких етапах процесу газ отримує тепло, а на яких — віддає? Яка кількість теплоти більша за модулем — отримана чи віддана? На скільки більша?

**Розв'язання.** Робота газу на етапі  $a - b$  дорівнює нулю, адже об'єм газу не змінюється. Внутрішня ж енергія газу на цьому етапі збільшується, тому що під час ізохорного підвищення тиску температура газу (і, отже, його внутрішня енергія) збільшується. Таким чином, на етапі  $a - b$   $\Delta U > 0$ ,  $A_r = 0$ , звідки випливає, що  $Q_{a-b} > 0$ .

Робота газу на етапі  $b - c$  додатна, тому що газ розширюється. Внутрішня енергія на цьому етапі збільшується, бо внаслідок ізобарного розширення температура газу (а отже, його внутрішня енергія) збільшується. Таким чином, на етапі  $b - c$   $A_r > 0$ ,  $\Delta U > 0$ , звідки випливає, що  $Q_{b-c} > 0$ .

Міркуючи аналогічно, отримуємо, що на етапі  $c - d$   $\Delta U < 0$ ,  $A_r = 0$ , тому  $Q_{c-d} < 0$ . На етапі  $d - a$   $\Delta U < 0$ ,  $A_r < 0$ , тому  $Q_{d-a} < 0$ .

Щоб визначити, яка кількість теплоти більша за модулем — отримана газом за весь цикл чи віддана газом, застосуємо перший закон термодинаміки  $Q = \Delta U + A_r$  до всього циклу в цілому. Після завершення циклу газ повертається до початкового стану, тому зміна його внутрішньої енергії дорівнює нулю:  $\Delta U = 0$ . Отже,  $Q = A_r$ .

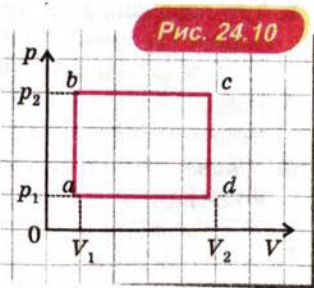


Рис. 24.10

Газ виконав за цикл *додатну* роботу, що чисельно дорівнює площі, обмеженої графіком циклу в координатах  $p, V$ . Таким чином, отримана газом кількість теплоти більша за модулем, ніж віддана ним, на величину  $Q = A_r = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ .

**Відповідь:** газ одержує тепло на етапах  $a - b$  і  $b - c$ , віддає тепло на етапах  $c - d$  і  $d - a$ . Отримана газом кількість теплоти за модулем більша, ніж віддана.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Внутрішня енергія — це сума кінетичної енергії хаотичного руху всіх частинок, що входять до складу даного тіла, та потенціальної енергії їх взаємодії.
- Внутрішню енергію тіла можна змінити за допомогою теплопередачі, тобто без виконання роботи (у разі контакту тіл різної температури), а також за допомогою виконання роботи.
- Перший закон термодинаміки: зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює сумі кількості теплоти, переданої тілу, і роботи, виконаної над тілом:  $\Delta U = Q + A$ . Друге формулювання: кількість теплоти, передана тілу, дорівнює сумі зміни внутрішньої енергії тіла та роботи, виконаної тілом (газом):  $Q = \Delta U + A_r$ .



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Який розділ фізики називають термодинамікою?
2. Що таке внутрішня енергія?
3. Як змінюється внутрішня енергія твердого тіла під час: а) нагрівання; б) охолодження; в) плавлення?
4. Які ви знаєте способи зміни внутрішньої енергії?
5. Ви потримали в руці монету, і вона нагрілася. Який був цього разу спосіб зміни внутрішньої енергії монети?
6. Що таке кількість теплоти? Яка одиниця кількості теплоти?
7. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
8. Тілу передали деяку кількість теплоти, причому тіло не виконувало роботу. Чи змінилася при цьому внутрішня енергія тіла? Якщо так, то збільшилася вона чи зменшилася?
9. Наведіть приклади застосування першого закону термодинаміки до газових процесів.
10. У якому процесі вся кількість теплоти, передана газу, перетворюється в роботу?

## Другий рівень

11. Наведіть приклади процесів, у яких внутрішня енергія змінюється. Як вона змінюється в кожному випадку — збільшується чи зменшується?
12. Чому температура людського тіла залишається приблизно однаковою, хоча людина постійно передає навколишньому повітрю певну кількість теплоти, якщо температура повітря нижча за температуру тіла?
13. Наслідком якого закону є перший закон термодинаміки?
14. Як пов'язана кількість теплоти, передана тілу, зі зміною внутрішньої енергії тіла за умови ізохорного процесу?
15. Чому під час ізобарного нагрівання газу передають більшу кількість теплоти, ніж під час ізохорного? Зміна температури в обох випадках однакова.
16. Чи змінюється внутрішня енергія газу внаслідок ізотермічного процесу, коли тиск збільшується?
17. Газ ізотермічно стискується. Віддає чи отримує він при цьому деяку кількість теплоти?
18. Який процес називають адіабатним?
19. Унаслідок адіабатного процесу внутрішня енергія тіла збільшилася. Виконало тіло при цьому роботу або роботу було виконано над тілом?
20. Газ даної маси внаслідок ізобарного розширення збільшив свій об'єм на 200 л. Яку роботу виконав газ? Тиск газу дорівнює атмосферному.



## § 25. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ, ХОЛОДИЛЬНИКИ ТА КОНДИЦІОНЕРИ

---

1. Теплові двигуни
2. Холодильники та кондиціонери

### 1. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Діапазон застосування теплових двигунів надзвичайно великий — від автомобілів до електростанцій та космічних ракет.

Широке застосування теплових двигунів стало можливим завдяки відкриттям учених і винаходам інженерів. Серед учених слід особливо відзначити французького вченого Карно, який розробив першу теорію теплових двигунів, а серед інженерів — англійського винахідника Ватта, ім'ям якого названа одиниця потужності ват.

#### ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС РОБОТИ ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

У теплових двигунах хімічна енергія палива перетворюється на механічну енергію. Це здійснюється у два етапи:

- 1) унаслідок згоряння палива хімічна енергія (потенціальна енергія взаємодії атомів) перетворюється в кінетичну енергію хаотичного руху молекул. При цьому нагрівається певна маса газу, яку називають *робочим тілом*;
- 2) газ (робоче тіло) розширюється, виконуючи роботу (звичай рухаючи поршень). При цьому газ охолоджується, тобто кінетична енергія хаотичного руху молекул перетворюється на механічну енергію.

#### ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

Дія теплового двигуна має *циклічний характер*: після того як робоче тіло (газ) розширилося, виконавши роботу, його стискають до початкового об'єму для того, щоб воно виконало роботу в наступному циклі. Однак, стискаючи газ, доводиться виконувати роботу *над газом*. Причому ця робота має бути *меншою* від роботи, виконаної газом, — адже тільки за цієї умови тепловий двигун виконає корисну роботу. Виходить,

розширення газу має відбуватися за більшого тиску, а отже, і за більш високої температури, ніж стиснення.

Таким чином, для того, щоб тепловий двигун виконував корисну роботу, необхідно періодично *нагрівати* і *охолоджувати* робоче тіло, тобто періодично передавати робочому тілу і відбирати від нього певну кількість теплоти. Тому тепловий двигун складається з трьох основних елементів:

- 1) *робоче тіло* — зазвичай газ;
- 2) *нагрівник*, що має температуру  $T_1$ , у контакті з яким робочому тілу надають кількість теплоти  $Q_1$ ;
- 3) *холодильник*<sup>1</sup>, що має температуру  $T_2 < T_1$ , у контакті з яким від робочого тіла відбирають кількість теплоти  $Q_2$ .

Нагрівником є паливо, яке спалюють в тепловому двигуні, а холодильником — найчастіше навколишнє повітря чи вода водоймища.

### КОРИСНА РОБОТА ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

Після завершення кожного циклу робоче тіло повертається до початкового стану, тому зміна внутрішньої енергії робочого тіла за цикл  $\Delta U = 0$ . Тоді з першого закону термодинаміки випливає, що корисна робота, виконана двигуном,  $A_k = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівника, а  $Q_2$  — кількість теплоти, яку робоче тіло віддало холодильнику (рис. 25.1).



<sup>1</sup> Напевно, точніше було б називати його «охолоджувачем» (за аналогією з нагрівником), оскільки холодильником називають також прилад для охолодження, що широко застосовується (його роботу буде розглянуто далі).

## КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД) ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

Ефективність теплового двигуна тим вища, чим більшу корисну роботу  $A_k$  він виконує за тієї ж кількості теплоти  $Q_1$ , отриманої від нагрівника.

Коефіцієнтом корисної дії  $\eta$  теплового двигуна називають відношення корисної роботи  $A_k$ , виконаної двигуном, до кількості теплоти  $Q_1$ , отриманої від нагрівника, і виражене у відсотках:  $\eta = \frac{A_k}{Q_1} \cdot 100 \%$ .

Оскільки  $A_k = Q_1 - Q_2$ , отримуємо  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%$ . Кількість теплоти  $Q_2$ , передана холодильнику, завжди більша за нуль, тому коефіцієнт корисної дії будь-якого теплового двигуна менший, ніж 100 %.

Отже, за допомогою теплового двигуна в механічну роботу можна перетворити тільки частину кількості теплоти, отриманої від нагрівника.

**Максимально можливий ККД теплового двигуна.** Під час створення теплових двигунів виникло запитання: яким є максимально можливий коефіцієнт корисної дії теплового двигуна за заданих температур нагрівника і холодильника? Відповідь на це найважливіше для створення теплових двигунів запитання дав Карно у вже згадуваному творі «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу».

Карно довів, що максимально можливий ККД має так званий «ідеальний тепловий двигун», під час роботи якого немає контакту тіл з різною температурою.

Карно показав, що ідеальний тепловий двигун має

максимально можливий коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot 100 \%$$

**Як збільшити ККД теплового двигуна?** З формули для максимально можливого ККД теплового двигуна випливає, що для його підвищення слід зменшувати відношення  $T_2/T_1$ . Цього можна досягти двома способами: або знижуючи температуру холодильника  $T_2$ , або підвищуючи температуру нагрівника  $T_1$ . Однак температура холодильника  $T_2$  не може бути нижчою від температури навколишнього повітря, тому реально збільшувати  $\eta_{\max}$  можна, тільки



збільшуючи температуру нагрівника  $T_1$ . При цьому, однак, слід врахувати, що температура нагрівника не має наближуватися до температури плавлення матеріалів, з яких виготовлено двигун.

Формула  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$  відповідає максимально

можливному ККД теплового двигуна. Такий ККД мав би «ідеальний тепловий двигун», у якому нема контакту між тілами з різною температурою. Однак такий тепловий двигун, маючи теоретично максимально можливий ККД, із практичної точки зору був би зовсім не ідеальним, адже за відсутності різниці температур між робочим тілом і нагрівником (або холодильником) теплопередача відбувалася б нескінченно повільно. Тому в реальних теплових двигунів, у яких обов'язково є контакт між тілами з різною температурою, ККД набагато менший за максимально можливий. Наприклад, у двигуна внутрішнього згоряння  $\eta_{\max} \approx 70\%$ , а реальний ККД не перевищує 30%. Дизельні двигуни мають ККД близько 40%.

## 2. ХОЛОДИЛЬНИКИ ТА КОНДИЦІОНЕРИ

У цьому розділі ми будемо використовувати слово «холодильник» в іншому значенні (наближеному до «життєсько-го»). Ми називатимемо так *холодильну машину*, тобто прилад, призначений для охолодження (наприклад, продуктів).

### ХОЛОДИЛЬНИК

Те, що холодильник *охолоджує* продукти, які розміщено в ньому, відомо всім, а от те, що при цьому він *нагріває* повітря в приміщенні, де він перебуває, знає далеко не кожний. Як же холодильник може нагрівати повітря — хіба в нього є гарячі частини? Так: це або трубки теплообмінника на задній стінці, або самі бічні стінки (у сучасних моделях).

Отже, холодильник передає тепло від *менш нагрітого* тіла (холодних продуктів у холодильній камері) *більш нагрітому* тілу (повітрю в приміщенні).

Однак для створення потоку тепла у *зворотному* напрямі (від холодного тіла до гарячого) необхідно *виконувати роботу*. У холодильнику цю роботу виконує електродвигун: ось чому для роботи холодильника його слід підключати до електричної мережі (рис. 25.2).



Щоб зрозуміти принцип роботи холодильника, розглянемо, що відбувається, коли робоче тіло (газ) робить цикл у зворотному напрямі — розширюється за більш низької температури, а стискується — за більш високої. Розширюючись за низької температури, газ *відбирає тепло від більш холодного тіла*, а стискуючись за високої температури, він *віддає тепло більш нагрітому тілу*<sup>1</sup>.

Щоб створювати потік тепла у зворотному напрямі (від холодного тіла до гарячого), доводиться *виконувати* роботу, оскільки тепер треба стискувати газ за високої температури, тобто за високого тиску, а розширюється він за низької температури, тобто за низького тиску. Стиснення газу в холодильній машині здійснює компресор, що споживає енергію з електричної мережі.

## КОНДИЦІОНЕР І ТЕПЛОВИЙ НАСОС

**Кондиціонер.** Якщо відкриту холодильну камеру холодильника залишити *усередині* кімнати, а гарячі трубки теплообмінника винести *назовні*, то холодильна камера відбиратиме тепло від повітря в кімнаті, а гарячі трубки теплообмінника віддаватимуть тепло зовнішньому повітрю. У результаті кімната охолоджуватиметься, а зовнішнє повітря — трохи нагріватиметься. Саме так і працює *кондиціонер* (рис. 25.3).

**Тепловий насос.** Цікаво, що прилад з таким самим принципом дії, що й у холодильника, можна використовувати

<sup>1</sup> У побутових і промислових холодильниках замість розширення і стиснення газу відбувається випаровування і конденсація спеціальної рідини: під час випаровування поглинається велика кількість теплоти, а під час конденсації — виділяється (див. § 23. Фазові переходи).



Кількість теплоти,  
відібрана  
від повітря у приміщенні

Кількість теплоти,  
передана  
зовнішньому повітря

Робоче тіло

$$Q_2 = A + Q_1$$

Робота  
електричного  
струму

не тільки для охолодження, а й для *обігріву* приміщення! Для цього знову «рознесемо в просторі» холодильну камеру і гарячі трубки теплообмінника, але цього разу гарячі трубки залишимо в кімнаті, а холодильну камеру винесемо назовні.

Холодильна камера тепер відбиратиме тепло від зовнішнього повітря, а трубки теплообмінника — передаватимуть тепло повітрю в приміщенні. Ми отримаємо *тепловий насос*.

Тепловий насос економічно вигідніший за електричний обігрівач, бо передана повітрю в кімнаті кількість теплоти  $Q_2 = A + Q_1$  більша від роботи  $A$  електричного струму на величину  $Q_1$ , що дорівнює кількості теплоти, відібраної від зовнішнього повітря.

Сучасні побутові кондиціонери конструюють зазвичай так, що вони можуть працювати і як кондиціонери, і як теплові насоси — залежно від пори року.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Основні елементи теплового двигуна: робоче тіло, нагрівник і холодильник.
- Корисна робота, яку виконує тепловий двигун,  $A_k = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівника,  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана робочим тілом холодильнику.
- Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна:  $\eta = \frac{A_k}{Q_1} \cdot 100\%$ . Макси-

мально можливий ККД теплового двигуна:  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$ .

ККД реального теплового двигуна менше максимально можливого.





### Перший рівень

1. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи теплового двигуна?
2. Які основні елементи теплового двигуна?
3. Як пов'язана корисна робота, яку здійснює тепловий двигун, з кількістю теплоти, отриманої від нагрівника, та кількістю теплоти, відданої холодильнику?
4. Що таке коефіцієнт корисної дії теплового двигуна? Чому він не може дорівнювати 100 %?
5. Які існують можливості підвищення коефіцієнта корисної дії теплового двигуна?

### Другий рівень

6. Чому дорівнює максимально можливий коефіцієнт корисної дії теплового двигуна?
7. Чи може коефіцієнт корисної дії реального теплового двигуна дорівнювати максимально можливому коефіцієнту корисної дії?
8. Чи перетворюється під час роботи теплового двигуна внутрішня енергія одного виду у внутрішню енергію іншого виду? Обґрунтуйте свою відповідь.
9. Навіщо потрібні нагрівник і холодильник у роботі теплового двигуна?
10. Що звичайно використовують як холодильник під час роботи теплового двигуна? Проілюструйте вашу відповідь прикладами.
11. ККД теплового двигуна 25 %. У скільки разів кількість теплоти, яку робоче тіло віддало холодильнику, більша від корисної роботи, виконаної двигуном?
12. Робоче тіло отримує від нагрівника за 1 годину 800 МДж тепла, а віддає навколишньому середовищу 600 МДж тепла. Чому дорівнює ККД теплового двигуна?
13. Чи дорівнюватиме 100 % коефіцієнт корисної дії теплового двигуна, якщо б зникло тертя між частинами машини?
14. Температура водяної пари у момент виходу з парового котла теплової електростанції дорівнює 527 °С. Чому дорівнює максимально можливий ККД теплової станції, якщо холодильником є вода за температури 27 °С? У скільки разів максимальний ККД більший від реального (31 %)?
15. Чим відрізняється дія побутового холодильника від дії теплового двигуна та що у них спільного?
16. Спекотного дня господиня вирішила залишити на кухні увімкнений холодильник відчиненим, щоб він «охолоджував кухню». Чи дійсно в кухні стане прохолодніше?
17. Який принцип роботи кондиціонера? Що спільного в кондиціонера з холодильником і чим вони відрізняються?
18. Складіть задачу за темою «Теплові двигуни», відповіддю якої було б «ККД 40 %».

## § 26. НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

---

1. Необоротність теплових процесів
2. Енергетична та екологічна кризи

### 1. НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

#### ОБОРОТНІ ТА НЕОБОРОТНІ ПРОЦЕСИ

Серед явищ, що відбуваються навколо нас, є такі, що можуть протікати практично однаково як у прямому, так і у «зворотному» напрямі в часі — як у фільмі, що показують у зворотному порядку (від кінця до початку). Такі явища називають *оборотними*.

Явища ж, що можуть протікати тільки в одному напрямі, називають *необоротними*.

**Механічні явища.** Практично оборотними є механічні явища, у яких дуже мала роль тертя: прикладами можуть служити коливання вантажу на нитці або пружині. Якщо зняти такі явища, а потім показувати фільм у зворотному порядку, глядачі не помітять «оберненості часу»: їм здаватиметься, що вони спостерігають реальний процес.

Однак ті механічні явища, у яких *тертя* відіграє істотну роль, є «очевидно» необоротними: якщо показувати фільм про такі явища у зворотному порядку, глядачі відразу ж помітять зворотний порядок показу. Наприклад, якщо під час «прямого» показу фільму м'яч, що котиться по траві, природно сповільнюється і так само природно зрештою зупиняється, то під час «зворотного» показу м'яч, що лежить на траві, раптом без будь-якої причини починає котитися, причому швидкість його чомусь збільшуватиметься.

**Теплові явища.** Серед теплових явищ також є оборотні. Наприклад, під час адіабатного стиснення або розширення газу (тобто за відсутності теплопередачі) газ поводить себе подібно пружині: якщо натиснути на поршень, під яким міститься газ у теплоізолюваній циліндричній посудині,

а потім відпустити поршень, він почне коливатися — як вантаж, що підвішено до пружини.

Однак ті теплові явища, у яких істотну роль відіграє *теплопередача*, явно необоротні, тому що потік тепла спрямований завжди в один бік — від гарячого тіла до холодного.

Можна було б заперечити, що домашній холодильник здійснює передачу тепла у «зворотному» напрямі — від холодного тіла до гарячого (див. § 25. *Теплові двигуни, холодильники і кондиціонери*). Але для цього, як ми бачили, необхідно виконувати роботу. Її виконує електродвигун, а електроенергію для його роботи виробляють на електростанції, де роботу виконують теплові двигуни. Роботу ж теплових двигунів завжди супроводжують необоротні процеси, про що йтиметься далі в цьому параграфі.

**Необоротність реальних процесів.** Оскільки тертя або теплопередача певною мірою присутні в будь-якому процесі, усі процеси, що відбуваються в природі, є необоротними. Наприклад, коливання вантажу, підвішеного на нитці чи пружині, зрештою все ж таки загасають.

## 2. ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА КРИЗИ

### ЕНЕРГЕТИЧНА КРИЗА

«Енергетичну кризу», тобто недостатність енергії для подальшого розвитку промислового виробництва, вважають сьогодні однією з найбільш гострих проблем людства.

Однак як погодити енергетичну кризу із законом збереження енергії: адже якщо енергія *зберігається*, то як її може не вистачати?

Річ у тім, що енергетична криза полягає не просто в недостатності енергії, а в недостатності енергії, *придатної для перетворення в механічну енергію*.

Наприклад, ми бачили, що під час роботи теплових двигунів хімічна енергія палива перетворюється на механічну енергію. Це перетворення енергії є *необоротним*, а запаси палива на нашій планеті постійно зменшуються: наприклад, розвіданих запасів нафти за нинішнього темпу її використання вистачить усього на кілька десятиліть. А темп використання палива продовжує зростати!

Отже, енергетична криза є наслідком необоротності процесів, що відбуваються в природі і техніці.



## ЕКОЛОГІЧНА КРИЗА

Друга, не менш серйозна проблема, що стоїть перед людством, — це «екологічна криза».

Величезні масштаби перетворення енергії вже почали чинити «планетарний» вплив на клімат Землі та склад атмосфери.

Як ви вже знаєте, для роботи теплових двигунів потрібен холодильник, у контакті з яким робоче тіло віддає йому певну кількість теплоти. В усіх теплових двигунах таким холодильником є навколишнє середовище (атмосферне повітря і вода відкритих водойм). У результаті відбувається підвищення температури навколишнього середовища, яке називають «тепловим забрудненням» (рис. 26.1).



Рис. 26.1

Теплове забруднення зростає тому, що внаслідок згоряння величезної кількості палива підвищується концентрація вуглекислого газу в земній атмосфері, а за великої концентрації вуглекислого газу атмосфера не «випускає» у космічний простір теплове випромінювання нагрітої Сонцем поверхні Землі.

У результаті виникає «парниковий ефект», тобто температура підвищується ще більше.

Тому внаслідок роботи великої і все зростаючої кількості теплових двигунів — в основному на електростанціях і в автомобілях — середня температура на Землі протягом останніх десятиліть неупинно підвищується. Це загрожує глобальним потеплінням з дуже небажаними наслідками, до яких належать кліматичні катастрофи, танення льодовиків і підняття рівня світового океану.

Крім того, унаслідок спалювання палива в теплових двигунах витрачається необхідний для життя атмосферний кисень, а також утворюються шкідливі речовини, що забруднюють атмосферу.

## ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Щоб зменшити негативні наслідки роботи теплових двигунів, вчені та інженери діють у двох напрямках: з одного боку, удосконалюють ці двигуни, підвищуючи їхній ККД і зменшуючи викиди шкідливих речовин, з другого боку — використовують *енергозберігаючі технології*.

У країнах, де ці технології широко застосовуються, споживання енергії на виробництво тієї самої продукції (наприклад, одного автомобіля) у кілька разів нижче, ніж у країнах, де енергозберігаючим технологіям поки що не приділяють належної уваги.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Усі процеси, що відбуваються в природі й техніці, є певною мірою необоротними в часі, тобто можуть протікати тільки в одному напрямі.
- Для зменшення шкідливих впливів теплових двигунів на навколишнє середовище підвищують ККД двигунів, зменшують викид шкідливих речовин і використовують енергозберігаючі технології.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Наведіть приклади оборотних та необоротних процесів.
2. У яких випадках процеси і явища можна вважати практично оборотними?
3. Чи може бути оборотним процес, у якому тертя або теплопередача відіграють істотну роль?
4. Чи може механічна робота виконуватися тільки за рахунок охолодження якогось тіла? Обґрунтуйте свою відповідь.

5. Як впливають теплові двигуни на навколишнє середовище?
6. Чим зумовлена екологічна криза?
7. Як зменшити шкідливий вплив теплових двигунів на навколишнє середовище?

### Другий рівень

8. Що означає необоротність процесів у часі?
9. Які механічні явища є практично оборотними, а які — необоротними? Обґрунтуйте свою відповідь.
10. Які теплові явища є практично оборотними, а які — необоротними? Обґрунтуйте свою відповідь.
11. Чи може який-небудь реальний процес бути ідеально оборотним? Обґрунтуйте свою відповідь.
12. Чи пов'язана необоротність процесів із законом збереження енергії? Проілюструйте свою відповідь прикладами.
13. Чому існування енергетичної кризи не суперечить закону збереження енергії?
14. До чого призводить підвищення концентрації вуглекислого газу в атмосфері Землі?



## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- *Внутрішня енергія* — це сума кінетичної енергії хаотичного руху всіх частинок, що входять до складу даного тіла, та потенціальної енергії їхньої взаємодії одна з одною.
- Внутрішню енергію тіла можна змінити за допомогою *теплопередачі* без виконання роботи (під час контакту тіл різної температури) і за допомогою *виконання роботи*.
- *Перший закон термодинаміки*: зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює сумі кількості теплоти, переданої тілу, і роботи, виконаної над тілом:  $\Delta U = Q + A$ . Друге формулювання: кількість теплоти, передана тілу, дорівнює сумі зміни внутрішньої енергії тіла і роботи, виконаної тілом:  $Q = \Delta U + A_r$ .
- *Основні елементи теплового двигуна*: робоче тіло, нагрівник і холодильник. Корисна робота, яку виконує тепловий двигун,  $A_k = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівника,  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана робочим тілом холодильнику. *Коефіцієнт корисної дії* теплового двигуна:  $\eta = \frac{A_k}{Q_1} \cdot 100\%$ . Максимально можливий ККД теплового двигуна:  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$ .
- Для зменшення шкідливих впливів теплових двигунів на навколишнє середовище підвищують ККД двигунів, зменшують викид шкідливих речовин та використовують *енергозберігаючі технології*.
- Усі процеси, що відбуваються в природі й техніці, є певною мірою необоротними в часі, тобто можуть протікати тільки в одному напрямі.
- Потік тепла спрямований завжди в один бік — від гарячого тіла до холодного.

## ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

---

### 1. ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ТІЛА ПІД ЧАС РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

*Мета роботи:* вимірити прискорення кульки, що скочується похилим жолобом.

*Обладнання:* металевий жолоб, штатив із муфтою та затискачем, сталева кулька, металевий циліндр, вимірювальна стрічка, секундомір або годинник із секундною стрілкою.

#### Опис роботи

Рух кульки, що скочується жолобом, приблизно можна вважати рівноприскореним. За умови рівноприскореного руху без початкової швидкості модуль переміщення  $s$ , модуль прискорення  $a$  і час руху  $t$  пов'язані співвідношенням  $s = \frac{at^2}{2}$ . Тому, виміривши  $s$  і  $t$ , можна визначити прискорення  $a$  за формулою  $a = \frac{2s}{t^2}$ . Щоб підвищити точність вимірювання, треба поставити дослід кілька разів, а потім знайти середні значення вимічених величин.

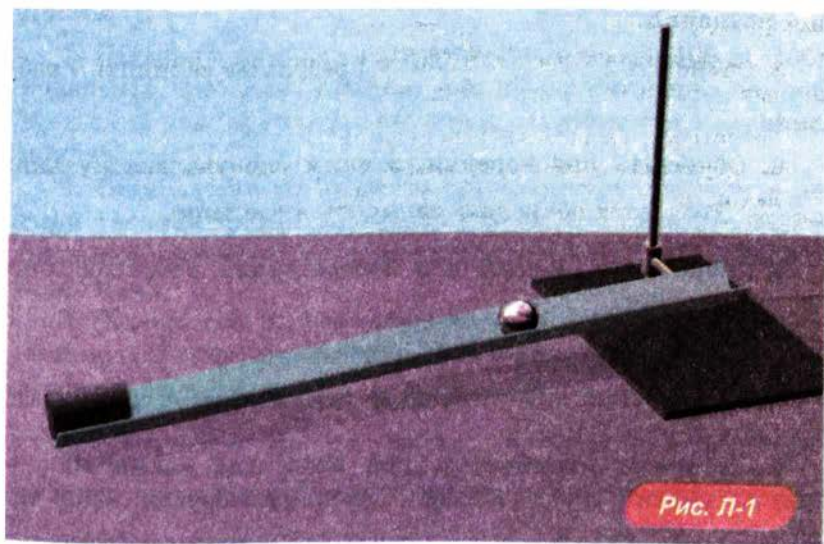


Рис. Л-1

## Хід роботи

1. Складіть установку, зображену на рис. ЛІ-1 (верхній кінець жолоба має бути на кілька сантиметрів вище від нижнього). Покладіть у жолоб біля його нижнього кінця металевий циліндр. Коли кулька, скотившись, удариться об циліндр, звук удару допоможе визначити час руху кульки.

2. Позначте на жолобі початкове положення кульки, а також її кінцеве положення — верхній торець металевого циліндра.

3. Вимірте відстань між верхньою та нижньою позначками на жолобі (модуль  $s$  переміщення кульки) і результат вимірювання запишіть у таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Далі наведено заголовок цієї таблиці.

№ досліду	$s$ , м	$t$ , с	$t_{\text{сер}}$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>

4. Вибравши момент, коли секундна стрілка знаходиться на поділці, кратній десяти, відпустіть кульку без поштовху біля верхньої позначки і виміряйте час  $t$  до удару кульки об циліндр.

Повторіть дослід 5 разів, записуючи у таблицю результати вимірювань. Проводячи дослід, щоразу пускайте кульку з одного початкового положення, а також слідкуйте за тим, щоб верхній торець циліндра був біля відповідної позначки.

5. Обчисліть  $t_{\text{сер}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$  і результат запишіть у таблицю.

6. Обчисліть прискорення, з яким скочувалася кулька:  $a \approx \frac{2s}{t_{\text{сер}}^2}$ . Результат обчислень запишіть в таблицю.

7. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт зроблені вами висновки.

## 2. ВИМІРЮВАННЯ СИЛ

*Мета роботи:* вимірити силу тяжіння, силу пружності та силу тертя.

*Обладнання:* динамометр, три різні тіла масою 100 — 400 г, гумовий джгут, лінійка, дерев'яний брусок, набір тягарців по 100 г.



## Опис роботи

Для вимірювання сил використовуйте шкільний динамометр.

**1. Вимірювання сили тяжіння.** Підвісьте до пружини динамометра яке-небудь тіло. Якщо тіло перебуває у спокої, сила тяжіння, що діє на тіло, компенсується силою пружності розтягнутої пружини динамометра. Отже, визначаючи значення сили пружності за шкалою динамометра, ви вимірюєте силу тяжіння, що діє на це тіло.

**2. Вимірювання сили пружності.** Прикріпіть до пружини динамометра гумовий джгут і потягніть динамометр в один бік, а джгут — у протилежний. Згідно з третім законом Ньютона сила пружності пружини динамометра дорівнює за модулем протилежно напрямленій силі пружності джгута. У такий спосіб ви вимірюєте силу пружності, що виникає унаслідок розтягування гумового джгута.

**3. Вимірювання сили тертя.** Тягніть рівномірно дерев'яний брусок по поверхні столу так, щоб сила, що діє на брусок з боку динамометра, була спрямована горизонтально. У цьому випадку сила пружності пружини динамометра компенсує силу тертя ковзання, тобто рівна їй за модулем і напрямлена протилежно. У такий спосіб ви вимірюєте силу тертя ковзання, що діє між столом і бруском.

## Хід роботи

### Дослід № 1

**1.** Підвісьте до динамометра тягарець масою 100 г. Переконайтеся, що сила тяжіння, яка діє на тягарець, компенсується силою пружності пружини динамометра і дорівнює приблизно 1 Н.

**2.** Підвішуючи до пружини динамометра два, три й чотири тягарці по 100 г, переконайтеся, що сила пружності пружини динамометра дорівнює приблизно 2 Н, 3 Н, 4 Н відповідно.

**3.** Підвісьте до динамометра по черзі тіла невідомої маси. Запишіть покази динамометра в таблицю, заголовок якої наведено нижче.

тіло	$F_{\text{тяж}}$ , Н	$m$ , кг

4. Обчисліть масу кожного тіла. Результати запишіть у таблицю. Вважайте, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

## Дослід № 2

1. Прикріпіть до пружини динамометра гумовий джгут.

2. Розтягніть джгут так, щоб сила пружності джгута була 4 Н. Виміряйте лінійкою, чому дорівнює видовження джгута. Результат запишіть у таблицю.

3. Складіть джгут удвічі й знову прикріпіть до динамометра.

4. Ще раз розтягніть джгут так, щоб сила пружності джгута була 4 Н. Знову виміряйте, чому дорівнює видовження джгута. Результат запишіть у таблицю в зошиті для лабораторних робіт.

джгут	$F_{\text{пр}}, \text{ Н}$	$\Delta x, \text{ м}$
одинарний		
подвійний		

## Дослід № 3

1. Покладіть на горизонтальну поверхню парти дерев'яний брусок.

2. Прикріпивши до бруска пружину динамометра, рухайте брусок прямолінійно рівномірно. Покази динамометра запишіть у таблицю.

3. Помістіть на брусок по черзі 1, 2 й 3 тягарці по 100 г. Знову приведіть брусок за допомогою динамометра у стан прямолінійного рівномірного руху і запишіть показання динамометра у таблицю в зошиті для лабораторних робіт.

тіло	$F_{\text{тер. кова}}, \text{ Н}$
брусок	
брусок + 1 тягарець	
брусок + 2 тягарці	
брусок + 3 тягарці	

4. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт зроблені вами висновки.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОВАГИ ТІЛА ПІД ДІЄЮ ДЕКІЛЬКОХ СИЛ<sup>1</sup>

*Мета роботи:* підтвердити на досліді умови рівноваги тіла.

*Обладнання:* тіло неправильної форми з цупкого карто-ну (далі «картон»), три металеві скріпки, міцна нитка, три динамометри, штатив із муфтою й тонким металевим стер-жем, набір тягарців по 100 г.

#### Опис роботи

Щоб підтвердити першу умову рівноваги (рівність нулю векторної суми сил, що діють на тіло), вивчають на досліді рівновагу тіла під дією трьох сил.

Щоб підтвердити другу умову рівноваги (тіло, закріпле-не на осі, перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, що прагнуть обертати тіло в одному напрямі, дорівнює сумі моментів сил, що прагнуть обертати його в протилежно-му напрямі), виміряють на досліді суми моментів сил, що прагнуть обертати тіло в протилежних напрямках.

#### Хід роботи

##### Дослід № 1

1. Прикріпіть за допомогою скріпок та уривків міцної нитки до картону три динамометри так, щоб три точки крі-плення ниток були розташовані приблизно на однакових від-станях одна від одної (див. рис. Л-3).

2. Розташуйте картон горизонтально на столі над арку-шем паперу.

3. Потягніть за динамометри в різні сторони так, щоб під дією трьох сил картон перебував у спокої. Проведіть на кар-тоні лінії, уздовж яких напрямлені нитки, до яких прикрі-плено динамометри. Запишіть покази динамометрів.

4. Продовжіть за допомогою лінійки проведені на картоні прямі лінії. Якщо дослід проведено ретельно, ці лінії мають перетнутися в одній точці. З цієї точки вздовж отриманих відрізків направте зображені в одному масштабі сили, що діяли на тіло.

Щоб переконатися, що векторна сума цих сил дорівнює нулю ( $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$ ), побудуйте із векторів сил за допомогою паралельного перенесення трикутник (нагадаємо: якщо три вектори є сторонами трикутника, то векторна сума цих век-торів дорівнює нулю).

<sup>1</sup> Цю роботу треба проводити вдвох.



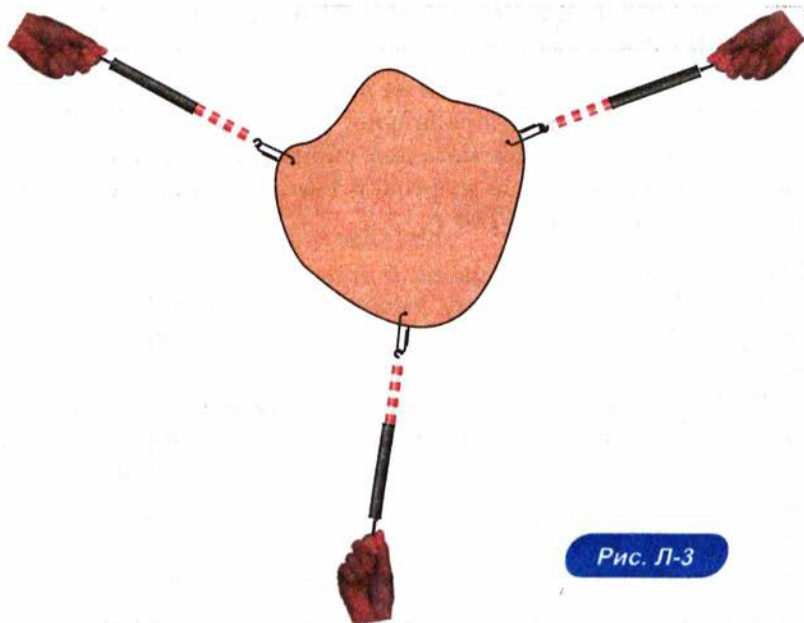


Рис. П-3

## Дослід № 2

1. Звільніть картон від динамометрів та врівноважте його на вертикально поставленому олівці в горизонтальному положенні. У точці, якою тіло спиралося при цьому на олівець, проробіть у картоні отвір і закріпіть тіло на горизонтальному стержні так, щоб воно могло легко обертатися навколо осі, якою служить стержень.

2. До двох скріпок підвісьте тягарці різної маси: 100 г і 200 г.

3. До третьої скріпки прикріпіть за допомогою нитки динамометр і, потягнувши за нього, урівноважте картон, закріплений на осі. При цьому лінія дії сили, що діє на картон з боку динамометра, має також бути у площині картону. Проведіть на картоні лінії, уздовж яких напрямлені нитки, до яких прикріплено вантажі та динамометр. Запишіть, чому дорівнює вага кожного тягарця, а також покази динамометра.

4. Зніміть картон із стержня і під лінійку продовжіть лінії, проведені на картоні. Проведіть перпендикуляри з осі обертання на лінії дії сил та виміряйте їх довжину — це плечі сил. Отримані значення сил та їхніх плечей запишіть у таблицю в зошиті для лабораторних робіт.

$F_1$	$l_1$	$M_1$	$F_2$	$l_2$	$M_2$	$l_3$	$M_3$

Позначте стрілкою біля кожної сили напрям, у якому ця сила прагне обертати тіло: якщо проти годинникової стрілки, то поставте стрілку, спрямовану вліво, а якщо за годинниковою стрілкою, то вправо.

5. Обчисліть моменти кожної з трьох сил (ваги двох тягарців і сили, прикладеної з боку динамометра), і запишіть у таблицю.

6. Переконайтеся, що тіло перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, що прагнуть обертати тіло в одному напрямі, дорівнює сумі моментів сил, що прагнуть обертати тіло в протилежному напрямі.

7. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт зроблені вами висновки.

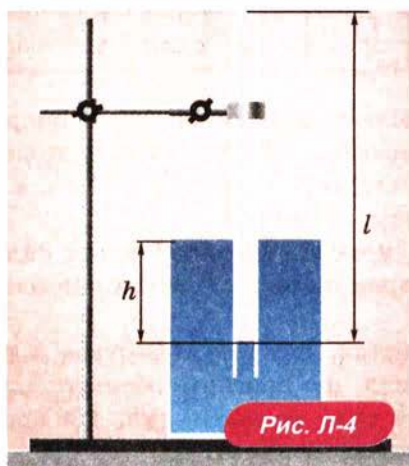
#### 4. ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ БОЙЛЯ—МАРІОТТА

*Мета роботи:* дослідна перевірка закону Бойля—Маріотта.

*Обладнання:* скляний циліндр заввишки 50 см, скляна трубка завдовжки 50–60 см, закрита з одного кінця, склянка, пластилін, термометр, лінійка, барометр-анероїд (один на клас), штатив із лапкою, холодна й гаряча вода.

##### Опис роботи

У циліндр з водою опускають відкритим кінцем униз трубку (див. рис. Л-4). Якщо рівень води в трубці нижче за рівень води в посудині на  $h$ , то тиск повітря в трубці дорівнює сумі атмосферного тиску та тиску стовпа води висотою  $h$ . Для спрощення розрахунків можна вимірювати тиск у міліметрах ртутного стовпа. Тоді з урахуванням того, що густина води в 13,6 разів менша за густину ртуті, для повітря в трубці можна записати  $p = H + \frac{h}{13,6}$ , де  $H$  — атмосферний тиск у міліметрах ртутного стовпа,  $h$  — різниця рівнів води в циліндрі й трубці, що вимірюється в міліметрах. У трубці міститься постійна маса повітря, температуру якого можна вважати постійною (кімнатною). Об'єм і тиск повітря, поміщеного в трубку, можна змінювати, змінюючи глибину занурення трубки. Об'єм повітря в трубці  $V = l \cdot S$ , де  $l$  — довжина стовпа повітря;  $S$  — площа перерізу трубки.



Оскільки площа поперечного перерізу трубки постійна, довжина стовпа повітря в трубці пропорційна об'єму повітря. Тому для перевірки закону Бойля—Маріотта достатньо перевірити справедливість рівності  $\left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l = \text{const.}$

### Хід роботи

1. Складіть установку (див. рис. Л-4).
2. Вимірте барометром атмосферний тиск у мм рт. ст.
3. Занурюючи у воду трубку відкритим кінцем униз, вимірте  $h$  (повторіть дослід тричі).
4. Результати вимірювань і обчислень занесіть у таблицю в зошиті для лабораторних робіт. Далі наведено заголовок цієї таблиці.

№ дослід	$H$ , мм рт. ст.	$h$ , мм	$l$ , см	$c = \left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l$

5. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт зроблені вами висновки.



## 5. ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

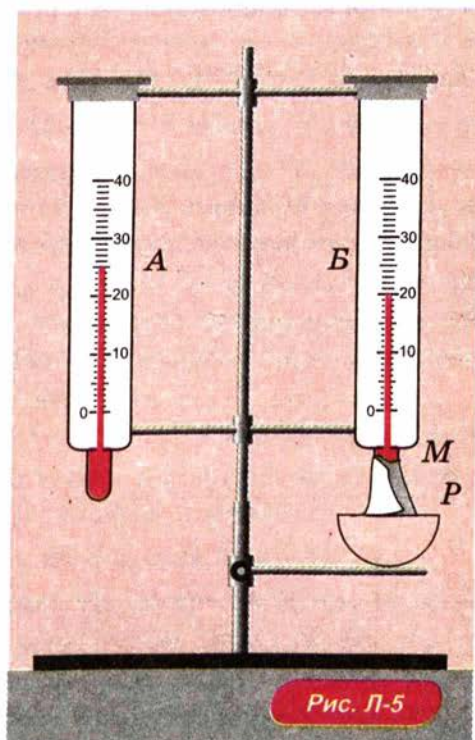
*Мета роботи:* навчитися визначати вологість повітря.

*Обладнання:* психрометр; склянка з водою; психрометрична таблиця.

### Опис роботи

Психрометр складається з двох однакових термометрів, один з яких обгорнуто вологою тканиною. Якщо водяна пара в повітрі не насичена, то вода з тканини випаровуватиметься, завдяки чому покази вологого термометра будуть меншими, ніж сухого.

Що інтенсивніше випаровується вода (тобто що менш вологість повітря), то нижчими є покази «вологого термометра». За різницею показів двох термометрів можна вимірювати вологість повітря. З цією метою складають так звані психрометричні таблиці, за допомогою яких визначають конкретні значення відносної вологості повітря.



## Хід роботи

1. На початку уроку налейте воду в резервуар термометра, обгорнутого марлею (див. рис. Л-5).

2. Зачекавши хвилин 20–25 (доки покази вологого термометра перестануть змінюватися)<sup>1</sup>, запишіть покази сухого і вологого термометрів у таблицю в зошиті для лабораторних робіт. Далі наведено заголовок цієї таблиці.

$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{волог}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$

3. За допомогою психрометричної таблиці визначте відносну вологість повітря.

4. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт зроблені вами висновки.

---

<sup>1</sup> Під час очікування розв'яжіть у зошиті 1–2 задачі на цю тему.

## Відповіді

- § 2. 10. 20 м/с; 5 м/с; у 4 рази. 12. 2,5 м/с, у додатному; через 12 с. 13. 80 км/год. 14. 75 км/год; тому що з меншою швидкістю тіло рухається протягом більшого проміжку часу.
- § 3. 12. 2 м/с<sup>2</sup>; через 5 с. 13. Через 2 с. 14. На північ; на південь. 16. Через 1 с. 17. Рівномірно зі швидкістю 10 м/с. 19. Не відповідає;  $v_{1x} = 1 + 0,25t$ ;  $v_{2x} = 3 - 0,5t$ .
- § 4. 9. 80 км, 120 км, 180 км. 10. Друге; у 2 рази. 12. 5 м. 13. 10 см, 30 см, 50 см. 15. 6 м/с. 16. 1 хв. 17. 100 м. 19.  $8 \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup>; 2,5 мс. 20. 51 км/год.
- § 5. 9. У 12 разів. 10. 15 мкм/с; 170 мкм/с; 1 см/с. 11. 316 м/с<sup>2</sup>. 12. 1 км/с; потрібно використовувати тривалість місячного місяця (близько 29 діб). 13. 15,3 км. 14. 80 м.
- § 7. 17. Для жителів Харкова практично однаковий, для жителів Землі — ні. 19. Першої; у 2,5 рази. 20. 12 см; 1 кН/м. 21. 2 Н або 8 Н залежно від напрямку сил. 22. 5 Н.
- § 8. 11. 10 Н. 12. 5 кН. 13. Під час піднімання. 14. У найвищій. 15. 30 або 70 Н залежно від напрямку сил. 16. 5 м/с<sup>2</sup>.
- § 9. 12. Прискорення однакові. 17. На коня діє напрямлена вперед сила тертя спокою з боку землі, і ця сила більша, ніж сила пружності, з якою візок тягне коня назад.
- § 10. 11.  $g_3/g_M = 6$ ;  $g_C/g_3 = 28$ . 12. 1,7 км/с. 13. На середині відрізка, що сполучає центри куль 1 і 2. 14. На відрізку, що сполучає центри куль 1 і 4 кг, на відстані 1 м від кулі 1 кг. 15. Другого.
- § 11. 11. Від 70 до 90 м. 12. 2 м/с. 13. Не менше 3,6 Н. 14. 0,3.
- § 12. 6. 920 Н. 7. 30 с. 8. 6 м/с<sup>2</sup>. 9. 9,6 Н. 10. 90 і 120 Н відповідно. 11. 360 і 540 Н відповідно.
- § 13. 13. 3 м/с. 14. 4 м/с. 15. 30 кг. 16. 1 м/с.
- § 14. 14. У 4 рази. 16. 0,5 Дж. 17. 60 Дж. 19. 60 Вт. 20. 35 кВт.
- § 15. 16. 40 кДж. 17. 20 кН/м. 18. 90 Дж. 19. У 4 рази. 20. 5,4 м. 21. 3 м/с. 23. 36 %. 24. 20 м/с або 72 км/год; це більше за швидкість автомобіля в 1,2 рази.



- § 17. 6. У тій системі, де події відбуваються в одній точці. 7. Годинник на станції. 8.  $4,6 \cdot 10^{-5}$  с. 9.  $1,44 \cdot 10^{21}$  Дж. 10.  $3 \cdot 10^{16}$  Дж. 11. 1000 МВт.
- § 18. 12. Розмір молекули олії приблизно дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-9}$  м.
- § 19. 13. 56 молів. 15.  $2,7 \cdot 10^{-26}$  кг. 17.  $1,4 \cdot 10^{22}$ . 18. 20 молів. 19.  $3,3 \cdot 10^{21}$ . 20.  $6,7 \cdot 10^{24}$ . 21.  $0,3 \text{ см}^3$ . 22. Однакова кількість.
- § 20. 12. Рідина внаслідок нагрівання розширюється сильніше, ніж скло. 13. Вода в діапазоні температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $4^\circ\text{C}$ .
- § 21. 19. Зменшилася на 40 %. 20. Зменшилася на 17 %. 21. Маса азоту в 14 разів більша.
- § 22. 11.  $3,7 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3$ ; приблизно у 1000 разів.
- § 23. 11. Між краплею та сковорідкою виникає прошарок пари, а пара, як і будь-який газ, погано проводить тепло. 14. 36 %.
- § 24. 15. У ході ізобарного нагрівання не тільки збільшується внутрішня енергія газу, але й газ виконує роботу. 17. Віддає. 19. Роботу було здійснено над тілом. 20. 20 кДж.
- § 25. 11. У 3 рази. 12. 25 %. 14. 62,5 %, у 2 рази.

# Предметно-іменний покажчик

- Абсолютна температура 188  
Абсолютна шкала температур 187  
Абсолютний нуль 189  
Авогадро А. 182  
Адіабатний процес 234  
Аморфні тіла 208  
Арістотель 4  
Бор Н. 6  
Броунівський рух 173  
Броун Р. 173  
Вага 93  
Ват — одиниця потужності 140  
Ватт Дж. 140  
Взаємодія молекул 174  
Вимірювання сил 72  
Вимірювання температури 186  
Випаровування 219  
Відносна вологість 223  
Відносна молекулярна (атомна) маса 180  
Відносність проміжків часу 163  
Відносність одночасності 161  
Відносність руху 20  
Внутрішня енергія 229  
Газовий термометр 187  
Газові закони 192  
Гельмгольц Г. 150  
Герц Г. 158  
Гіпотеза 5  
Гравітаційна стала 101  
Гук Р. 72  
Галілей Г. 4, 64  
Демокрит 171  
Джоуль Дж. 150  
Джоуль — одиниця роботи та енергії 137  
Динамічна рівновага 220  
Динамометр 73  
Дифузія 174  
Додавання сил 73  
Другий закон Ньютона 82  
Ейнштейн А. 159, 174  
Екологічна криза 249  
Експеримент 5  
Енергетична криза 248  
Енергія 146  
Енергія спокою 166  
Енергія тіла 166  
Жорсткість пружини 73  
Закон Авогадро 200  
Закон Бойля—Маріотта 196  
Закон всесвітнього тяжіння 100  
Закон Гей-Люссака 193  
Закон Гука 72  
Закон збереження енергії 150  
Закон збереження імпульсу 126  
Закон збереження механічної енергії 149  
Закон інерції 64  
Закон Шарля 194  
Замкнута система тіл 125  
Змочування 211, 213  
Ізобара 193  
Ізобарний процес 192, 235  
Ізопроеци 192  
Ізотерма 196  
Ізотермічний процес 195, 234  
Ізохора 194  
Ізохорний процес 193, 234  
Імпульс 124  
Інерціальні системи відліку 65  
Кавендиш Г. 103  
Каденюк Л. 129  
Капілярність 213  
Капілярні явища 212  
Кельвін 188  
Кельвін — одиниця абсолютної температури 189  
Кеплер І. 103  
Кибальчич М. І. 129  
Кипіння 222

- Кількість речовини 181  
 Кількість теплоти 232  
 Кінематика 17  
 Кінетична енергія 147  
 Коефіцієнт корисної дії (ККД)  
     теплового двигуна 242  
 Коефіцієнт тертя 109  
 Кондиціонер 244  
     Кондратюк Ю. В. 129  
 Корольов С. П. 14, 129  
 Кристали 205  
 Кристалізація 218  
 Кристалічні ґратки 205  
 Майєр Р. 150  
 Макроскопічні та мікроскопічні  
     параметри 177  
 Максвелл Дж. 158  
 Максимальна сила тертя  
     спокою 110  
 Максимально можливий ККД  
     теплового двигуна 242  
 Маса 80  
 Матеріальна точка 17  
 Метод наукового пізнання 5  
 Механічна енергія 147  
 Механічна робота 135  
 Механічний рух 17  
 Миттєва швидкість 34  
 Молекулярна будова живих  
     організмів 215  
 Молекулярно-кінетична  
     теорія 171  
 Момент сили 118  
 Нагрівник 241  
 Насичена пара 220  
 Наукова ідеалізація 5  
 Наукова теорія 6  
 Науковий закон 6  
 Наукові моделі 5  
 Невагомість 93  
 Ненасичена пара 220  
 Необоротність теплових  
     процесів 247  
 Непружне зіткнення 124  
 Непружний удар 124  
 Ньютон І. 66, 82, 88, 100, 102  
 Ньютон — одиниця сили 83  
 Обертота частота 53  
 Основне завдання механіки 17  
 Основне завдання молекулярно-  
     кінетичної теорії 177  
 Основні положення  
     молекулярно-кінетичної  
     теорії 171  
 Охорона навколишнього  
     середовища 250  
 Переміщення 21  
 Період обертання 53  
 Перша космічна  
     швидкість 102, 105  
 Перший закон Ньютона 66  
 Перший закон термодинаміки  
     233  
 Плавлення 218  
 Плазма 214  
 Полімери 215  
 Понселе В. 135  
 Попович П. 129  
 Постулати теорії  
     відносності 159  
 Потенціальна енергія 146  
 Потенціальна енергія  
     здеформованої  
     пружины 147  
 Потенціальна енергія піднятого  
     вантажу 146  
 Потужність 139  
 Правило моментів 118  
 Принцип відносності  
     Галілея 156  
 Принцип відносності  
     Ейнштейна 159  
 Принцип відповідності 6  
 Прискорення 35  
 Прискорення вільного  
     падіння 39  
 Прискорення за умови  
     рівномірного руху по  
     колу 55  
 Прямолінійний рівномірний  
     рух 28  
 Прямолінійний  
     рівноприскорений рух 36



Реактивний рух 128  
Рівнодійна 73  
Рівномірний рух по колу 52  
Рівняння Клапейрона 199  
Рівняння Менделєєва—  
Клапейрона 200  
Рівняння стану 177  
Рівняння стану газу 199  
Рідини 210  
Рідкі кристали 214  
Робота сили пружності 139  
Робота сили тяжіння 138  
Робота сил тертя ковзання 139  
Робоче тіло 241  
Рух молекул 172  
  
Середня швидкість 30, 43, 48  
Сила 69  
Сила натягу нитки або троса 92  
Сила опору під час руху в  
рідині або газі 111  
Сила пружності 69  
Сила тертя ковзання 107  
Сила тертя спокою 109  
Сила тяги 90  
Сила тяжіння 69  
Сили тертя 107  
Сили тертя ковзання 70  
Система відліку 20  
Смолуховський М. 174  
Спеціальна теорія  
відносності 158  
Співвідношення між шкалою  
Цельсія та абсолютною  
шкалою температур 189

Способи зміни внутрішньої  
енергії 232  
Спостереження 5  
Стала Авогадро 182  
  
Температура 185  
Температура плавлення 207, 218  
Теплова рівновага 185  
Тепловий насос 244  
Теплові двигуни 240  
Теплопередача 232  
Тіло відліку 20  
Точка роси 227  
Траєкторія 21  
Третій закон Ньютона 88  
  
Умова рівноваги тіла для  
поступального руху 117  
Умова рівноваги тіла,  
закріпленого на осі 118  
Умови рівноваги тіл 117  
  
Фазові переходи 218  
Фізичне тіло 17  
  
Холодильник 241  
  
Ціолковський К. Е. 129  
  
Швидкість світла 167  
Шкала Кельвіна 189  
Шлях 21  
Шонін Г. 129  
Штучний супутник Землі 102  
  
Явище інерції 66

# Зміст

До вчителя та учня.....	3
Вступ.....	4
1. Зародження та розвиток фізики як науки.....	4
2. Роль фізичного знання в житті людини й розвитку суспільства.....	4
3. Методи наукового пізнання.....	5
4. Фізика і техніка в Україні.....	7

## РОЗДІЛ 1. КІНЕМАТИКА

§ 1. Механічний рух.....	17
1. Основне завдання механіки.....	17
2. Фізичне тіло та матеріальна точка.....	17
3. Система відліку. Відносність руху.....	20
4. Траєкторія, шлях і переміщення.....	21
5. Векторні величини у фізиці.....	23
§ 2. Прямолінійний рівномірний рух.....	28
1. Швидкість прямолінійного рівномірного руху.....	28
2. Графіки прямолінійного рівномірного руху.....	29
3. Середня швидкість.....	30
§ 3. Прямолінійний рівноприскорений рух.....	34
1. Миттєва швидкість.....	34
2. Прискорення.....	35
3. Прямолінійний рівноприскорений рух.....	36
4. Вільне падіння.....	38
§ 4. Приклади розв'язування задач.....	43
1. Рівняння руху.....	43
2. Робота з графіками.....	44
3. Шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні проміжки часу.....	45
4. Задачі, в умові яких не дано часу руху.....	46
5. Середня швидкість під час прямолінійного рівноприскореного руху.....	48
§ 5. Рівномірний рух по колу.....	52
1. Модуль та напрям швидкості за умови рівномірного руху по колу.....	52
2. Кутова швидкість.....	53
3. Період обертання та обертова частота.....	53
4. Прискорення за умови рівномірного руху по колу.....	55

## РОЗДІЛ 2. ДИНАМІКА

§ 6. Закон інерції — перший закон Ньютона.....	62
1. Коли швидкість тіла змінюється?.....	62
2. Закон інерції.....	64
3. Інерціальні системи відліку та перший закон Ньютона.....	65
4. Застосування явища інерції.....	66
5. Чи очевидний перший закон Ньютона?.....	67

<b>§ 7. Взаємодії та сили</b>	<b>69</b>
1. Сили в механіці	69
2. Чим характеризується кожна сила?	70
3. Приклади дії сил	71
4. Вимірювання сил	72
5. Додавання сил	73
<b>§ 8. Другий закон Ньютона</b>	<b>77</b>
1. Співвідношення між силою та прискоренням	77
2. Маса	80
3. Другий закон Ньютона	82
4. Рух тіла під дією сили тяжіння	83
5. Чи очевидний другий закон Ньютона?	85
<b>§ 9. Третій закон Ньютона</b>	<b>88</b>
1. Третій закон Ньютона	88
2. Властивості сил, з якими тіла взаємодіють	89
3. Приклади виявлення та застосування третього закону Ньютона	90
4. Вага і невагомість	93
5. Чи очевидний третій закон Ньютона?	96
6. Межі застосовності законів Ньютона	97
<b>§ 10. Закон всесвітнього тяжіння</b>	<b>100</b>
1. Закон всесвітнього тяжіння	100
2. Рух штучних супутників Землі та космічних кораблів	101
3. Як було відкрито закон всесвітнього тяжіння?	102
4. Як «зважили» Землю?	103
5. Як визначити першу космічну швидкість?	105
<b>§ 11. Сили тертя</b>	<b>107</b>
1. Сила тертя ковзання	107
2. Сила тертя спокою	109
3. Сила опору під час руху в рідині або газі	111
<b>§ 12. Рух і рівновага тіла під дією декількох сил</b>	<b>114</b>
1. Рух тіла під дією декількох сил	114
2. Умови рівноваги тіл	117
<b>§ 13. Імпульс. Закон збереження імпульсу</b>	<b>124</b>
1. Імпульс	124
2. Закон збереження імпульсу	125
3. Реактивний рух	128
4. Непружне зіткнення рухомих тіл	130
<b>§ 14. Механічна робота. Потужність</b>	<b>135</b>
1. Механічна робота	135
2. Яку роботу треба виконати, щоб розігнати тіло?	138
3. Робота різних сил	138
4. Потужність	139
5. Коли робота дорівнює нулю?	141
6. Робота декількох сил	142



<b>§ 15. Енергія.....</b>	<b>146</b>
1. Механічна енергія .....	146
2. Коли механічна енергія зберігається? .....	148
3. Приклад розв'язування задачі .....	149
4. Закон збереження енергії.....	150

## **РОЗДІЛ 3. РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА**

<b>§ 16. Основні положення спеціальної теорії відносності.....</b>	<b>156</b>
1. Принцип відносності Галілея.....	156
2. Чи можна поширити принцип відносності на всі фізичні явища? .....	158
3. Основні положення спеціальної теорії відносності.....	158
<b>§ 17. Деякі наслідки спеціальної теорії відносності..</b>	<b>161</b>
1. Відносність одночасності .....	161
2. Відносність проміжків часу.....	163
3. Енергія тіла .....	166
4. Чи скасовує теорія відносності класичну механіку? .....	167

## **РОЗДІЛ 4. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА**

<b>§ 18. Молекулярно-кінетична теорія .....</b>	<b>171</b>
1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії .....	171
2. Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії .....	177
<b>§ 19. Кількість речовини. Стала Авогадро .....</b>	<b>180</b>
1. Відносна молекулярна (атомна) маса.....	180
2. Кількість речовини .....	181
<b>§ 20. Температура .....</b>	<b>185</b>
1. Температура та її вимірювання.....	185
2. Абсолютна шкала температур.....	187
<b>§ 21. Газові закони.....</b>	<b>192</b>
1. Ізопроцеси.....	192
2. Рівняння стану газу.....	199
<b>§ 22. Стани речовини .....</b>	<b>204</b>
1. Порівняння газів, рідин і твердих тіл .....	204
2. Кристали, аморфні тіла та рідини.....	205
3. Інші стани речовини .....	214
<b>§ 23. Фазові переходи.....</b>	<b>218</b>
1. Плавлення та кристалізація .....	218
2. Випаровування та конденсація .....	218

## РОЗДІЛ 5. ТЕРМОДИНАМІКА

### § 24. Внутрішня енергія.

Перший закон термодинаміки.....	229
1. Внутрішня енергія.....	229
2. Закон збереження енергії в теплових явищах.....	232

### § 25. Теплові двигуни,

холодильники та кондиціонери.....	240
1. Теплові двигуни.....	240
2. Холодильники та кондиціонери.....	243

### § 26. Необоротність теплових процесів.

Охорона навколишнього середовища.....	247
1. Необоротність теплових процесів.....	247
2. Енергетична та екологічна кризи.....	248

### Лабораторні роботи.....253

1. Вимірювання прискорення тіла під час рівноприскореного руху.....	253
2. Вимірювання сил.....	254
3. Дослідження рівноваги тіла під дією декількох сил.....	257
4. Дослідна перевірка закону Бойля—Маріотта.....	259
5. Вимірювання відносної вологості повітря.....	261

### Відповіді.....263

### Предметно-іменний покажчик.....265

**Навчальне видання**

**Генденштейн Лев Елевич**

**Ненашев Ігор Юрійович**

# **ФІЗИКА**

**10 клас**

**Рівень стандарту**

*Підручник*

*для загальноосвітніх навчальних закладів*

**Редактор Г. Ф. Висоцька**

**Коректор Т. Є. Цента**

**Комп'ютерне верстання О. О. Удалова**

**Формат 60×90/16. Гарнітура шкільна. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 17,00. Обл.-вид. арк. 14,35.  
Тираж 91 589 прим. Замовлення №756.**

**ТОВ ТО «Гімназія»,  
вул. Восьмого Березня, 31, м. Харків 61052  
Тел.: (057) 719-17-26, (057) 719-46-80, факс: (057) 758-83-93  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 644 від 25.10.2001**

**Надруковано з діапозитивів, виготовлених ТОВ ТО «Гімназія»,  
у друкарні ПП «Модем»,  
вул. Восьмого Березня, 31, м. Харків 61052  
Тел. (057) 758-15-80  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ХК № 91 від 25.12.2003**