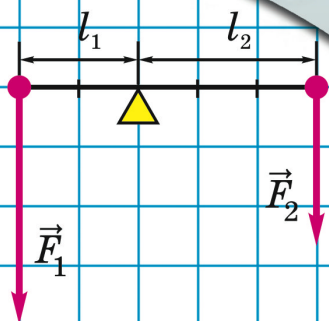


Л. Е. Генденштейн

ФІЗИКА

ПІДРУЧНИК

8
клас



 ГІМНАЗІЯ

Л. Е. Генденштейн

ФІЗИКА

П І Д Р У Ч Н И К

8

клас

Харків
«Гімназія»
2008

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
Г34

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1.4/18-689 від 27.03.2008 р.)*

Генденштейн Л.Е.

Г34 Фізика, 8 кл.: Підручник для середніх загальноосвітніх шкіл. —
Х.: Гімназія, 2008. — 256 с.: іл.

ISBN 978-966-474-010-1


ББК 22.3я721


ISBN 978-966-474-010-1


© Л. Е. Генденштейн, 2008
© ТОВ ТО «Гімназія», оригінал-макет,
художнє оформлення, 2008


ДО УЧНЯ


Для того щоб Вам було зручно працювати з цим підручником, ми розробили такі рубрики.

 — задача чи запитання з розв’язанням. Це важлива складова частина навчального матеріалу, яка допоможе **навчитися розв’язувати задачі**. Завдяки цьому Ви краще зрозумієте фізичні закони та зможете застосовувати їх у житті.

 — **запрошення до проведення досліду** (у фізичному кабінеті, шкільній фізичній лабораторії або вдома). Проводячи досліди, Ви отримаєте знання та вміння, потрібні Вам щодня.

 — **формулювання фізичного закону або визначення важливого фізичного терміну**. Запишіть це у свій конспект або робочий зошит.

 — додатковий матеріал рубрики «**Хочеш дізнатися більше?**». Тут наведено цікаві приклади фізичних явищ, нові застосування фізичних законів.

 — **головне в розділі**. Ця рубрика призначена для узагальнення та повторення.

Бажаємо Вам успіхів в оволодінні фізикою!

ДО ВЧИТЕЛЯ

Щоб надати Вам більшу можливість творчості під час викладання фізики, **кожний параграф** підручника розраховано приблизно на **один навчальний тиждень** (2 уроки), а параграфи розбито на пункти.

Можна, наприклад, на одному уроці розглянути зміст усього параграфа, а наступний урок присвятити обговоренню цього матеріалу та розв’язуванню задач. Можна також на першому уроці вивчити деякі пункти параграфа, а на наступному — решту пунктів цього параграфа.

Щиро бажаємо Вам творчого натхнення!

МЕХАНІЧНІ ЯВИЩА

РОЗДІЛ

1

МЕХАНІЧНИЙ РУХ

§ 1. Механічний рух.

Трасекторія, шлях і переміщення

§ 2. Прямолінійний рівномірний рух

§ 3. Прямолінійний нерівномірний рух

§ 4. Рух по колу. Обертальний рух

§ 5. Механічні коливання

§ 6. Звук



§ 1

МЕХАНІЧНИЙ РУХ. ТРАЄКТОРІЯ, ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ

1. Відносність руху
 2. Траєкторія
 3. Шлях
 4. Переміщення
- Хочеш дізнатися більше?

Геоцентрична та геліоцентрична системи світу

1. ВІДНОСНІСТЬ РУХУ

Подивіться навколо: усе рухається (рис. 1.1)! Ходять люди, їздять автомобілі, бігають тварини, літають птахи й літаки, течуть річки, плывуть хмари... Рухаються по небу Сонце, Місяць, планети й зорі... А «нерухомі» будинки, дерева та гори теж рухаються, якщо... дивитися на них, наприклад, із вікна поїзда чи автомобіля, що їдуть (рис. 1.2)!

Усе це — приклади *механічного руху*.

Механічним рухом називають змінювання з часом положення тіл у просторі відносно інших тіл.



Отже, рух завжди *відносний*: казати про рух будь-якого тіла можна тільки відносно *іншого* тіла. Спокій також є відносним: наприклад, хіба вам не здається, що ви *не-ребуєте у спокої*, лежачи на полиці поїзда, що *їде*, або сидячи в кріслі літака, що *летить*?

Усі ми є пасажирями величезного «космічного корабля» під назвою «Земля» — він рухається по орбіті навколо Сонця, пролітаючи щосекунди 30 кілометрів! А рух по небу Сонця, Місяця, планет і зір зумовлений добовим обертанням *Землі*, хоча ми й кажемо, що Сонце «сходить» і «заходить»! Спостерігаючи Всесвіт із Землі, ми дивимося на нього мов із величезної каруселі, яка виконує один оберт за добу. Але, сидячи вдома на дивані, ми не відчуваємо руху Землі — так само як пасажир, який сидить на полиці поїзда, що їде, не відчуває руху цього поїзда (рис. 1.2).

Думку про відносність руху та спокою вперше висловив видатний італійський учений Галілео Галілей.



Пасажи́р сидить на полиці поїзда, що їде. Розгляньмо, які тіла рухаються відносно пасажира, а які перебувають у спокої відносно нього.

Відносно пасажира рухаються, наприклад, Земля, будівля станції, провідник, який іде вагоном. А перебувають у спокої полиця, на якій сидить пасажир, сусід пасажира, який сидить поруч, автомобіль, який довго їде поряд з вагоном.



Рис. 1.1



Рис. 1.2

2. ТРАЕКТОРІЯ

Під час свого руху тіло мовби описує якусь лінію в просторі.

Лінію, уздовж якої рухається тіло, називають траєкторією руху тіла.

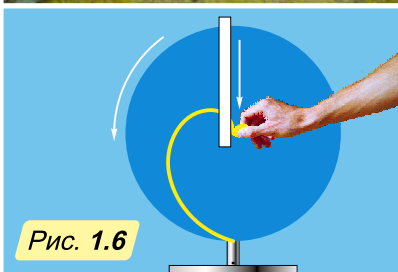
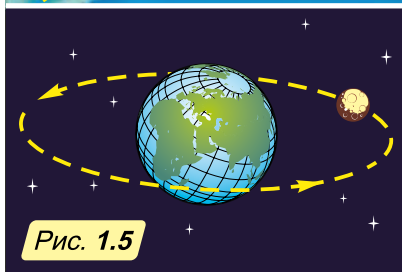
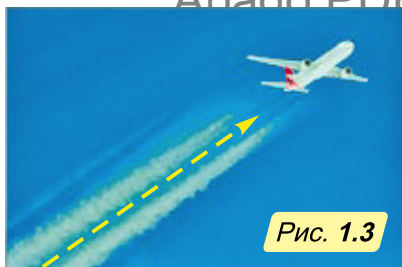


Наприклад, слід, що залишає крейда на дошці, є траєкторією руху крейди відносно дошки. Літак, що летить високо в небі, залишає за собою слід, який є траєкторією руху літака відносно Землі.

Рух тіла, за якого його траєкторія є відрізком прямої, називають **прямолінійним** (рис. 1.3).

Якщо ж траєкторія руху — крива лінія, рух називають **криволінійним** (рис. 1.4).

Важливий окремий випадок криволінійного руху — **рух по колу**. Таким рухом приблизно можна вважати рух Місяця відносно Землі, схематично зображений на рис. 1.5, а також рух планет відносно Сонця.



Оскільки рух є відносним, траєкторія руху тіла залежить від того, відносно якого тіла розглядають цей рух.



Проведемо дослід

Прикладемо лінійку до диска, який обертається, і проведемо шматком крейди вздовж лінійки. На диску залишиться слід у формі спіралі — це траєкторія руху крейди *відносно диска* (рис. 1.6). *Відносно ж лінійки* траєкторія руху того самого шматка крейди є прямолінійною!



Накреслимо приблизну траєкторію руху точки обода колеса велосипеда: а) відносно велосипедиста; б) відносно людини, яка стоїть біля дороги.

Відносно велосипедиста точка обода колеса рухається по колу, а відносно людини, яка стоїть біля дороги, — по складнішій кривій (рис. 1.7). Її називають циклоїдою.

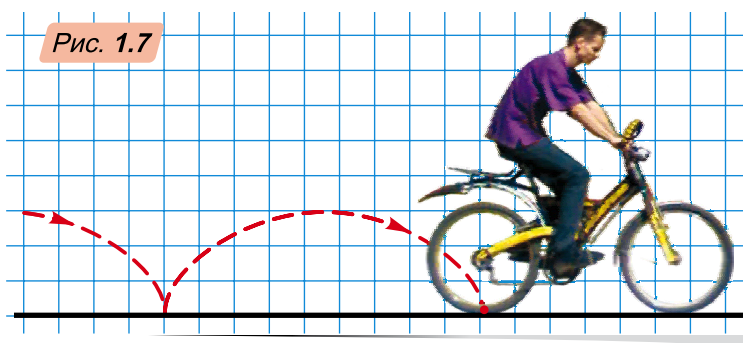


Рис. 1.7

Якщо кінцеве положення тіла збігається з початковим, траєкторію руху називають *замкненою* (рис. 1.8).



Рис. 1.8

3. ШЛЯХ

Довжину траєкторії називають шляхом, який пройшло тіло (або, для стислості, просто шляхом).



Шлях ми позначатимемо l . Як і будь-яку довжину, шлях у Міжнародній системі одиниць SI вимірюють у метрах (використовують також міліметри, сантиметри, кілометри тощо).

Навіть якщо деякі відрізки траєкторії накладаються один на одного (наприклад, автомобіль декілька разів проїхав по кільцевому шосе або по прямій дорозі туди й назад), то шлях дорівнює сумі довжин усіх частин траєкторії.

4. ПЕРЕМІЩЕННЯ

На рис. 1.9 зображено приклад траєкторії руху автомобіля: у початковий момент він перебував у точці 1, а в розглядуваний момент часу — у точці 2. Проведемо напрямлений відрізок від точки 1 до точки 2.

Переміщенням тіла називають напрямлений відрізок, проведений від початкового положення тіла до його положення в певний момент часу.



Переміщення характеризують **числовим значенням** (модулем) та **напрямом**. Величини, що їх характеризують числовим значенням і напрямом, називають **векторними** та на рисунках позначають стрілками. Для стислості векторні величини називають іноді просто векторами.



Чи може шлях, пройдений тілом, не дорівнювати нулю, а модуль переміщення дорівнювати нулю?

Модуль переміщення дорівнює нулю, якщо кінцеве положення тіла збігається з початковим. Але це не означає, що тіло весь час перебувало в спокої: воно могло рухатися та повернутися до початкового положення. У такому разі траєкторія руху тіла є **замкненою**. Наприклад, якщо автомобіль проїхав кільцевою дорогою повне коло радіусом 10 км, то пройдений шлях дорівнює 62,8 км, а переміщення дорівнює нулю.

ГЕОЦЕНТРИЧНА ТА ГЕЛІОЦЕНТРИЧНА СИСТЕМИ СВІТУ

У давнину Землю вважали центром Всесвіту й рух усіх тіл, зокрема Сонця та планет, розглядали тільки відносно Землі. Таке уявлення про будову Всесвіту називають **геоцентричною** системою (від грецького «гео» — «Земля»). У цій системі просто пояснити рух по небу Місяця та Сонця, але рух планет виглядає досить складним: вони рухаються то в один бік, то в інший, а часом навіть описують «петлі».

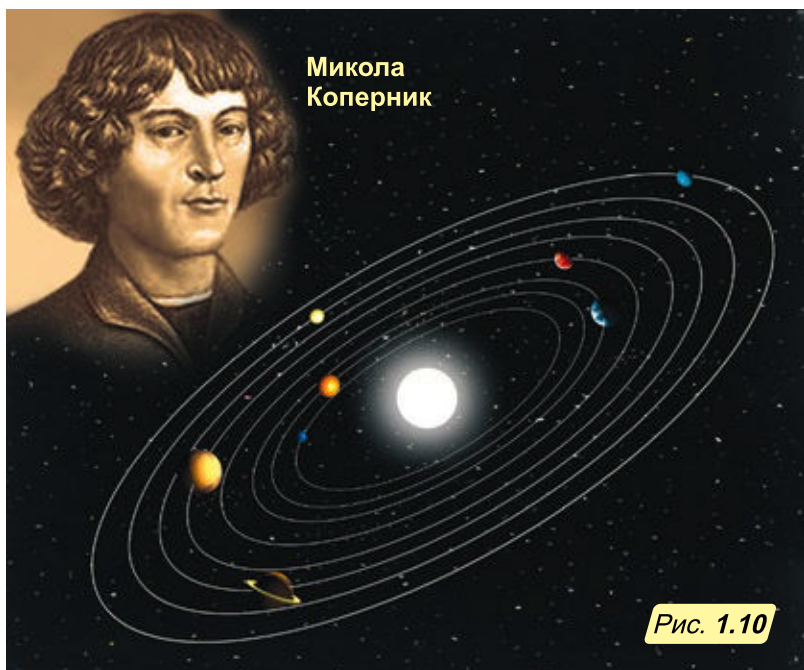
Розгадку такого дивного руху планет знайшов у 16-му столітті польський астроном Микола Коперник.

Планетні «петлі» Коперник пояснив тим, що ми спостерігаємо рух планет із Землі, яка так само, як і всі планети, рухається по коловій орбіті навколо Сонця. Планети разом із Землею Коперник образно назвав «дітьми Сонця». Запропоновану Коперником систему світу називають **геліоцентричною** системою світу (від грецького слова «геліос» — «сонце»). Схематично геліоцентричну систему світу зображено на рис. 1.10.

Учення Коперника розвив італійський учений і поет Джордано Бруно: він припустив, що зорі — це далекі сонця, а навколо них обертаються планети, на яких проживають розумні істоти.

За ідею «множинності світів» інквізиція присудила Бруно до спалення на вогнищі.

«Ви виносите мені вирок із більшим страхом, аніж я його вислуховую», — сказав Бруно своїм суддям. На Майдані Квітів у Римі, де 1600 року було спалено Джордано Бруно, стоїть нині пам'ятник йому. На п'єдесталі пам'ятника зображено суд над ученим (рис. 1.11).



Обґрунтуванню й розвитку вчення Коперника також присвятив більшу частину свого життя видатний італійський учений Галілео Галілей. Саме на цьому шляху він і відкрив перший закон механіки — закон інерції, з яким ви познайомитеся далі. Галілей також зазнав гонінь церк-

ви: під загрозою катувань інквізиція змусила вже старого вченого відректись від твердження, що Земля обертається навколо Сонця. Поставленому на коліна вченому посипали голову попелом, але легенда стверджує, що Галілей при цьому вимовив: «А все ж таки вона вертиться!».



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Наведіть приклади, що ілюструють відносність руху. Які тіла, зображені на рис. 1.1, рухаються одне відносно одного? Які — перебувають у спокої одне відносно одного?
2. Що таке траєкторія? Зобразіть у зошиті траєкторії руху кількох тіл.
3. Який рух називають прямолінійним? Криволінійним? Наведіть кілька прикладів руху по прямолінійних і криволінійних траєкторіях.
4. Чи залежить форма траєкторії руху тіла від того, відносно якого тіла розглядають рух цього тіла? Наведіть приклади, що підтверджують вашу відповідь.
5. Чи можна вважати замкненою траєкторію руху учня, який вийшов із дому та повернувся додому, якщо розглядати рух учня відносно Сонця?
6. Що таке шлях і переміщення? Чим характеризують переміщення? У яких випадках шлях дорівнює модулю переміщення?
7. Автомобіль проїхав по прямій дорозі довжиною 10 км і повернувся назад. Чому дорівнює шлях, пройдений автомобілем?

§ 2

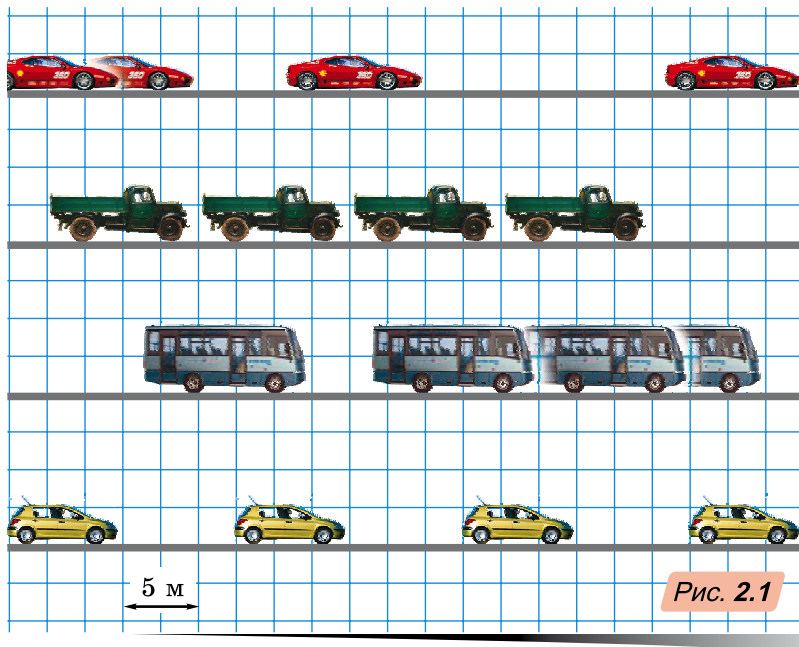
ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОМІРНИЙ РУХ

1. Прямолінійний рівномірний рух
2. Швидкість прямолінійного рівномірного руху
3. Одиниці швидкості
4. Чим допомагають формули?
5. Графіки прямолінійного рівномірного руху

1. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОМІРНИЙ РУХ

Найпростішим для вивчення є *прямолінійний рівномірний рух*. Із нього ми й почнімо.

На рис. 2.1 зображено положення трьох автомобілів і автобуса на прямій дорозі через *однакові* проміжки часу. Ми бачимо, що для вантажівки та жовтого автомобіля *переміщення, здійснені за однакові проміжки часу, однакові*. Ці тіла рухаються *прямолінійно рівномірно*.





Прямолинійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого тіло за будь-які однакові проміжки часу здійснює однакові переміщення.

2. ШВИДКІСТЬ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ



Швидкістю \vec{v} прямолинійного рівномірного руху називають відношення переміщення \vec{s} до проміжку часу t , за який відбулося це переміщення: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$.

З формули $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ випливає, що швидкість \vec{v} , як і переміщення \vec{s} , є **векторною** величиною, тобто її характеризують напрямом і числовим значенням — модулем, причому напрям швидкості збігається з напрямом переміщення, а модуль швидкості $v = \frac{s}{t}$, де s — модуль переміщення.

У разі прямолинійного рівномірного руху модуль переміщення s збігається зі шляхом l , який пройшло тіло, тому для прямолинійного рівномірного руху справедлива також формула $v = \frac{l}{t}$.

3. ОДИНИЦІ ШВИДКОСТІ

Одиницею швидкості в СИ є $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Це — швидкість неквапливої прогулянки.

Часто використовують також одиницю швидкості $1 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ — у таких одиницях задають, наприклад, швидкість автомобілів (так, дозволена швидкість їзди в населених пунктах — не більше ніж $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$). Швидкість ракет задають у $\frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Навчимося переводити значення швидкості з одних одиниць в інші — це часто виявляється корисним для розв'язання задач. Почнімо з найпростішої задачі.



Людина йде зі швидкістю $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Знайдімо її швидкість у кілометрах за годину.

За 1 годину, тобто за 3600 секунд, людина пройде $3600 \text{ м} = 3,6 \text{ км}$.

Отже, її швидкість дорівнює $3,6 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Варто зазначити, що числове значення швидкості, заданої в кілометрах за годину, у 3,6 раза більше за числове значення швидкості, задане у метрах за секунду. Завдяки цьому можна швидко переводити значення швидкості з одних одиниць в інші. Наприклад, $10 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 36 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а $72 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

4. ЧИМ ДОПОМАГАЮТЬ ФОРМУЛИ?

Розв'язувати задачі з фізики дуже допомагають формули, тому що *одна* формула є ключем до розв'язання *багатьох* задач!

Наприклад, використовуючи формулу $v = \frac{l}{t}$, можна розв'язати *будь-яку* задачу, у якій потрібно знайти швидкість прямолінійного рівномірного руху, якщо відомі пройдений шлях і час руху: для розв'язання задачі треба тільки підставити в цю формулу числові дані.

Деяких учнів фізичні формули лякають, — здебільшого тому, що ці учні забувають значення літер у формулах. Але не здавайтесь: якщо ви й забули значення літери в якійсь формулі, зазирніть ще раз у підручник фізики. Напишіть формулу 2–3 рази, повторюючи про себе значення всіх літер. А коли ви скористаєтесь будь-якою формулою кілька разів, вона стане вашим добрим другом і не раз допоможе вам розв'язувати задачі.

Незабаром ви переконаєтесь, що формули не ускладнюють фізику, а, навпаки, значно *спрощують* її, тому що вони є зручною *мовою*, яка дозволяє стисло та чітко формулювати фізичні закономірності та виявляти зв'язки між фізичними величинами.

5. ГРАФІКИ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ

ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТІ ШЛЯХУ ВІД ЧАСУ

У курсі математики ви вже вивчали графіки функцій. На рис. 2.2 зображено, наприклад, графік функції $y = 2x$. Це — графік прямої пропорційності, який є відрізком прямої, що проходить через початок координат. Для побудови такого графіка досить знайти ще одну його точку, тобто знайти значення функції для будь-якого відмінного від нуля значення незалежної змінної (наприклад, для $x = 1$).

Завдяки використанню графіків характер залежності однієї величини від іншої стає набагато наочнішим, тому графіки дуже широко використовують і у фізиці. Розгляньмо приклад.



Велосипедист їде прямолінійно й рівномірно зі швидкістю

$2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Побудуймо графік залежності шляху l від часу t .

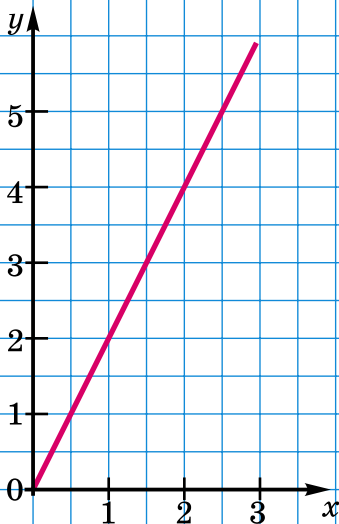


Рис. 2.2

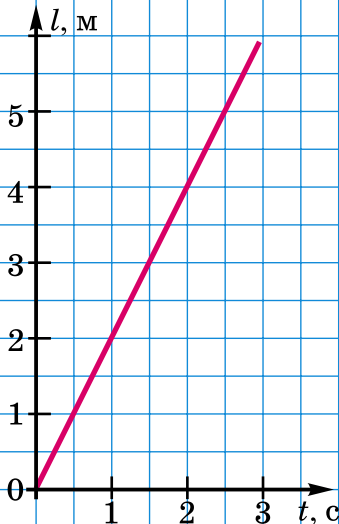


Рис. 2.3

Накреслимо координатні осі t і l , позначимо на них фізичні величини та їх одиниці. Залежність шляху l від часу t для прямолінійного рівномірного руху виражають формулою $l = vt$, де v — швидкість тіла. Це — формула прямої пропорційності, але тепер незалежною змінною є час t , функцією — шлях l , а коефіцієнтом пропорційності — модуль швидкості v . При $t = 1$ с шлях $l = 2$ м. Позначимо цю точку на координатній площині й проведемо відрізок, який проходить через цю точку та початок координат. На рис. 2.3 зображено шуканий графік залежності шляху від часу. Порівняйте його з графіком функції $y = 2x$, і ви побачите, що ці графіки дуже схожі.

Розгляньмо тепер, чим відрізняються графіки залежності шляху від часу для тіл, які рухаються з різною швидкістю.



Із селища одночасно виїхали велосипедист і автомобіль. Швидкість велосипедиста $20 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а швидкість автомобіля $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Побудуйте графіки залежності шляху від часу.

Побудуйте спочатку точки графіків, що відповідають шляху, який пройшли велосипедист і автомобіль за 1 год (червона та зелена точки на рис. 2.4). Провівши відрізки через початок координат і ці точки, дістаємо шукані графіки (рис. 2.4).

Зверніть увагу: графік для автомобіля нахилений під **більшим**

кутом до осі t , ніж графік для велосипедиста, тому що за той самий час автомобіль долає більший шлях. Отже, **що більша швидкість тіла, то більший кут між графіком залежності шляху від часу та віссю часу.**

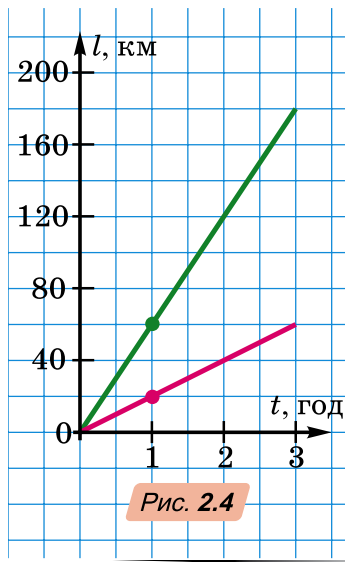


Рис. 2.4

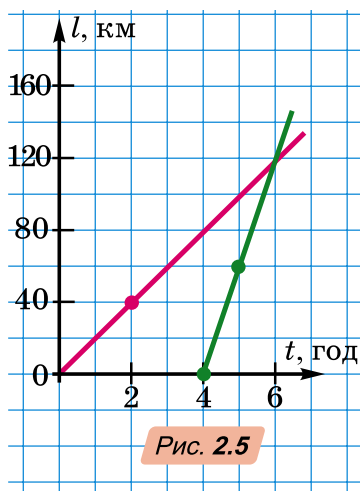
Використовуючи графіки залежності шляху від часу, розв'яжімо таку задачу.



Із селища виїхав велосипедист зі швидкістю $20 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а через 4 год по тому — автомобіль зі швидкістю $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Через який час після свого виїзду автомобіль дожене велосипедиста?

Розв'яжімо задачу графічно. Почнімо відлік часу від моменту виїзду велосипедиста. Графік залежності шляху від часу для велосипедиста зображено на рис. 2.5 червоною лінією.



Графік залежності шляху від часу для автомобіля є також відрізком прямої, але він **не проходить** через початок координат, тому що автомобіль почав рухатися через 4 год після початку відліку часу. Для побудови цього графіка (зелена лінія) виберемо дві точки: точку, що відповідає початку руху автомобіля, і точку, що відповідає 1 год після початку руху автомобіля (зелені точки на рис. 2.5). Графіки перетинаються при $t = 6$ год, відраховуючи від моменту виїзду велосипедиста, тобто через 2 год після виїзду автомобіля.

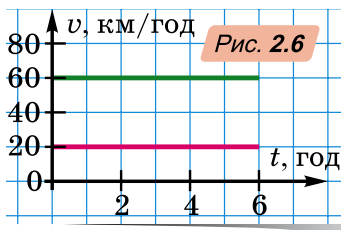
ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ВІД ЧАСУ

Під час прямолінійного рівномірного руху за будь-які однакові проміжки часу тіло проходить **однаковий** шлях, тому відношення $v = \frac{l}{t}$ не залежить від того, який саме проміжок часу використовують для визначення швидкості. Це означає, що під час такого руху швидкість тіла залишається сталою. Отже, графіком залежності модуля швидкості від часу¹ є відрізок прямої, паралельної осі часу.

Наприклад, на рис. 2.6 зображено графіки залежності швидкості від часу для розглянутих вище велосипедиста

¹ Далі для стислості ми називатимемо його просто графіком швидкості.

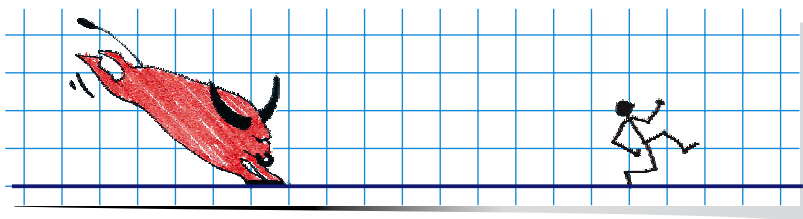
та автомобіля, якби вони почали рухатися одночасно.



Запитання та завдання для самоперевірки



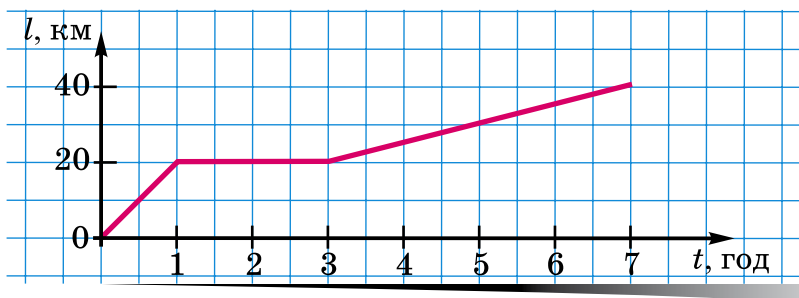
1. Який рух називають прямолінійним рівномірним? Наведіть приклади такого руху.
2. Як визначають швидкість прямолінійного рівномірного руху? Які ви знаєте одиниці швидкості?
3. Яким буде графік залежності шляху від часу для прямолінійного рівномірного руху? Зобразіть такі графіки для двох тіл, які рухаються з різними швидкостями.
4. Яким буде графік залежності модуля швидкості від часу для прямолінійного рівномірного руху? Зобразіть такі графіки для двох тіл, які рухаються з різними швидкостями.
5. Велосипедист їде зі швидкістю $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а автомобіль — зі швидкістю $108 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. У скільки разів швидкість автомобіля більша за швидкість велосипедиста?
6. Бик біжить зі швидкістю $34 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а дуже перелякана людина — зі швидкістю $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Хто біжить швидше?



7. Автомобіль рухається зі швидкістю $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Водій на секунду відвернув увагу, щоб відповісти на дзвінок мобільного телефону.

Яку відстань проїде автомобіль за цю секунду? Порівняйте її з довжиною вашого класу.

8. Швидкість штучного супутника Землі на навколоземній орбіті дорівнює приблизно $8 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. За який проміжок часу цей супутник проходить шлях, що дорівнює відстані від Києва до Харкова (приблизно 480 км)?
9. На наведеному нижче рисунку зображено графік залежності шляху від часу для школяра, який виїхав на велосипеді із селища та повернувся до селища. Розглядаючи цей графік, дайте відповіді на такі запитання: 1) скільки годин та з якою швидкістю школяр їхав на велосипеді? 2) скільки годин він намагався починити велосипед, що зламався? 3) чи вдалося йому починити велосипед? 4) скільки годин та з якою швидкістю школяр ішов пішки?



10. Чи змогла б людина обійти земну кулю по екватору за один рік, якби вона могла йти не зупиняючись? Уважайте, що довжина екватора земної кулі дорівнює 40 000 км, а швидкість ходьби дорівнює $4,6 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.



§3

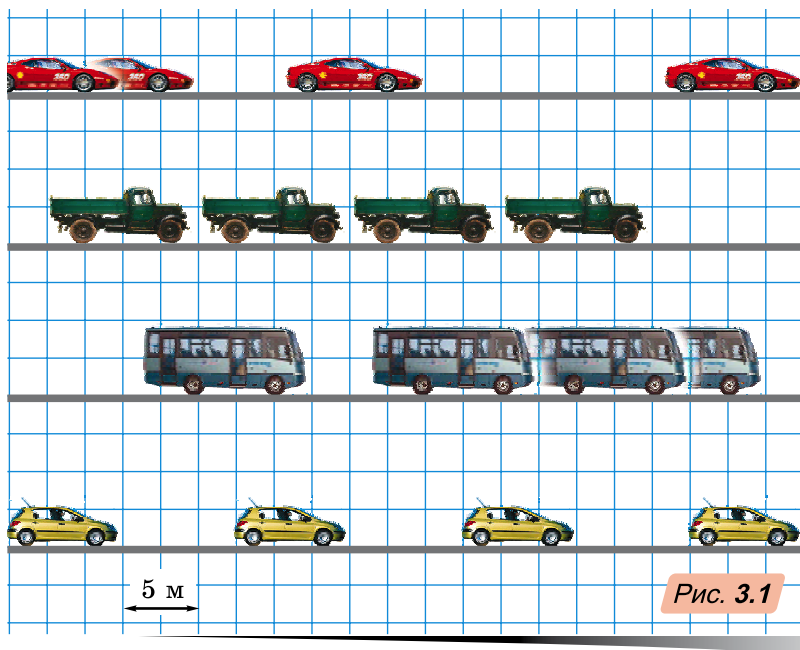
ПРЯМОЛІНІЙНИЙ НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ

1. Нерівномірний рух
2. Середня швидкість нерівномірного руху
3. Миттєва швидкість

1. НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ

Розгляньмо тепер такий рух тіла, коли воно за *однакові* проміжки часу проходить *різні* шляхи.

На рис. 3.1 зображено положення вже знайомих нам автомобілів і автобуса через однакові проміжки часу. Ми бачимо, що для червоного автомобіля та автобуса переміщення за однакові проміжки часу є *різними*. Ці тіла рухаються *нерівномірно*.



Рух, під час якого тіло проходить за однакові проміжки часу різний шлях, називають нерівномірним.





Використовуючи наведені рисунки, побудуймо приблизні графіки залежності шляху від часу для червоного автомобіля та автобуса. Будемо вважати, що одній клітинці на рисунку відповідає 1 м.

Для червоного автомобіля шлях, який він проходить за кожну наступну секунду, дорівнює відповідно 5 м, 15 м і 25 м. Відповідні точки позначено червоним на рис. 3.2. З'єднавши ці точки плавною кривою, дістанемо приблизний графік залежності шляху від часу (червона лінія). Аналогічно будуюмо графік шляху для автобуса (зелені точки та лінія).

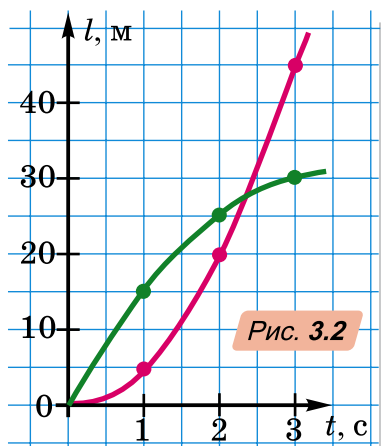


Рис. 3.2

2. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ НЕРІВНОМІРНОГО РУХУ

Для опису довільного руху використовують *середню швидкість*.



Середньою швидкістю \vec{v}_c за певний проміжок часу t називають відношення переміщення \vec{s} за цей проміжок часу до проміжку часу: $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$.

Зверніть увагу на слова «за певний проміжок часу». Вони вказують на те, що *при нерівномірному русі середня швидкість за різні проміжки часу може бути різною*.

У цьому параграфі ми будемо розглядати тільки *прямолінійний нерівномірний рух*, причому в одному напрямі. У такому разі, як ми вже знаємо, модуль переміщення s збігається зі шляхом l , який пройшло тіло. Тому за такого руху модуль середньої швидкості $v_c = \frac{l}{t}$. Розгляньмо на прикладі, як її знайти.



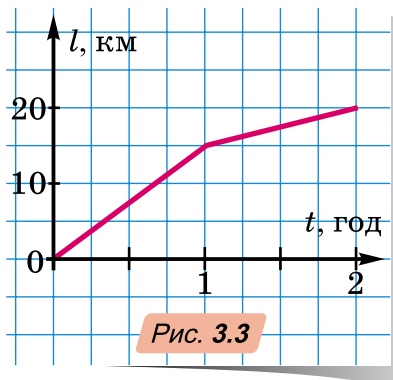
Знайдімо середню швидкість червоного автомобіля за першу секунду, за другу секунду, за третю секунду, за три секунди, користуючись рис. 3.1.

За першу секунду автомобіль проїхав 5 м, отже, його середня швидкість за першу секунду дорівнює $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Середня швидкість за другу секунду дорівнює $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а за третю — $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. За три секунди автомобіль проїхав шлях $l = 45$ м. Середню швидкість за весь час руху знаходимо за формулою $v_c = \frac{l}{t}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $v_c = \frac{45}{3} = 15 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$. Отже, коли автомобіль **розганяється**, його середня швидкість, узята за послідовні однакові проміжки часу, **збільшується**.

Розгляньмо дві задачі на знаходження середньої швидкості. Ці задачі можуть видатися вам дуже схожими, тому будьте уважні: чи побачите ви, чим ці задачі відрізняються?



Із селища вирушив учень на велосипеді й поїхав по прямій дорозі зі швидкістю $15 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Через годину він наздогнав приятеля і протягом 1 год ішов з ним пішки зі швидкістю $5 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, ведучи велосипед поруч. Побудуймо графік залежності шляху учня від часу та знайдемо середню швидкість учня за весь час руху.



Графік залежності шляху від часу наведено на рис. 3.3. Середня швидкість учня дорівнює відношенню всього шляху l до всього часу руху t . Учень рухався дві години: за першу годину він

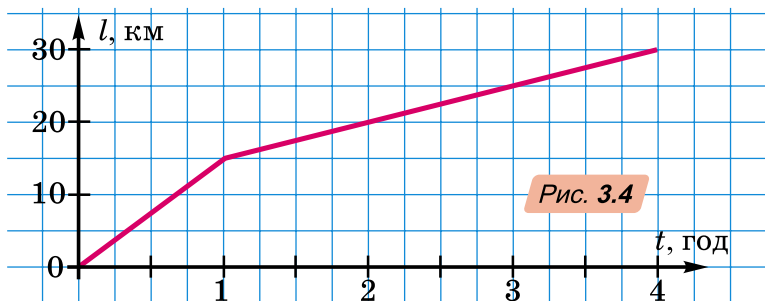
проїхав 15 км, а за другу годину пройшов 5 км. Отже, всього за дві години учень подолав 20 км. Тому $v_c = \frac{20 \text{ км}}{2 \text{ год}} = 10 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Розгляньмо тепер іншу, начебто схожу задачу — але відповідь у ній виявиться іншою! Розв'яжімо задачу і з'ясуємо, чому відповіді різні.



З одного селища в друге, відстань між якими 30 км, вирушив учень на велосипеді зі швидкістю $15 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Проїхавши половину всього шляху, він наздогнав приятеля і другу половину шляху йшов з ним пішки зі швидкістю $5 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, ведучи велосипед поруч. Знайдімо середню швидкість учня за весь час руху.

І в цьому випадку середня швидкість учня дорівнює відношенню всього шляху l до всього часу t . Увесь шлях ми знаємо: він дорівнює 30 км. Знайдемо час руху. Першу половину шляху (15 км) учень проїхав на велосипеді за 1 год, а другу половину (теж 15 км) пройшов за 3 год. Отже, на весь шлях учень витратив 4 год. Тому $v_c = \frac{30 \text{ км}}{4 \text{ год}} = 7,5 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Графік залежності шляху від часу в цьому випадку наведено на рис. 3.4.



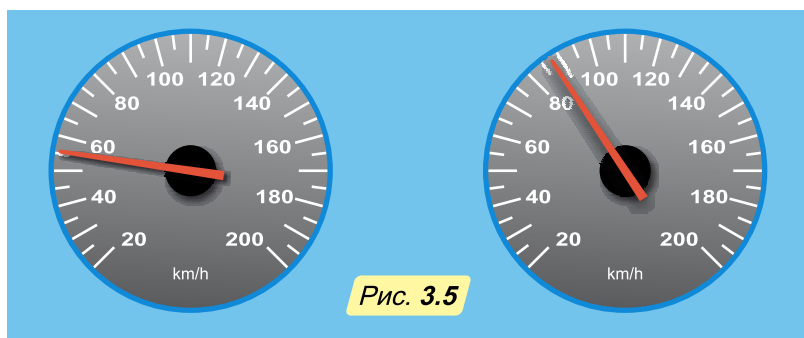
Може здатися дивним, що в другому випадку середня швидкість руху учня менша, ніж у першому випадку, хоча в обох випадках він їхав та йшов з тими самими швидкостями. Але помітимо, що в першому випадку учень їхав та йшов протягом *однакового* часу (по 1 год), у другому ж ви-

падку він їшов протягом *більшого* часу, ніж їхав (їхав 1 год, а їшов 3 год).

3. МИТТЄВА ШВИДКІСТЬ

Коли кажуть, що швидкість тіла *змінюється з часом*, мають на увазі *миттєву швидкість*, тобто швидкість у *певний момент часу*. Саме цю швидкість вимірює спідометр¹ автомобіля (рис. 3.5).

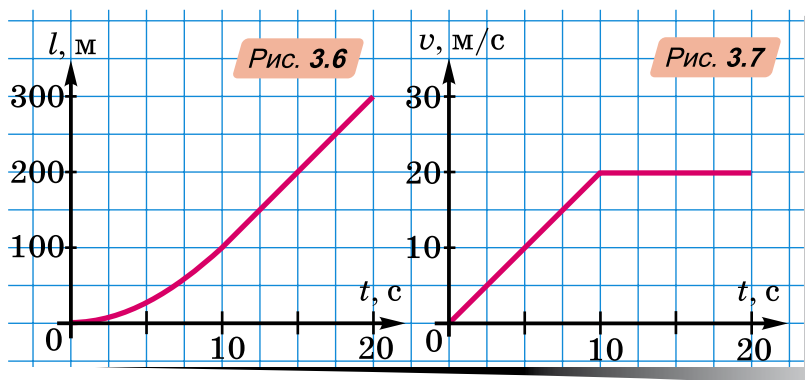
Стрілка спідометра часто «коливається» під час їзди, тому що швидкість автомобіля зазвичай змінюється з часом: водій обганяє інші автомобілі, гальмує перед перехрестями, розганяється після них тощо.



Миттєву швидкість тіла у певний момент часу можна розглядати як його середню швидкість за дуже малий проміжок часу, що включає цей момент. Тому, якщо нам дано графік залежності шляху від часу для нерівномірного руху, то про миттєву швидкість у той чи інший момент часу можна судити за кутом нахилу малої частини графіка, що містить цей момент.

Наприклад, на рис. 3.6 наведено графік залежності шляху від часу для деякого автомобіля. За нахилом різних частин графіка ми бачимо, що швидкість автомобіля протягом перших десяти секунд збільшувалась, а протягом наступних десяти секунд залишалася сталою. На рис. 3.7 наведено приблизний графік залежності миттєвої швидкості цього автомобіля від часу.

¹ Позначення km/h відповідає км/год.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Що таке нерівномірний рух? Наведіть декілька прикладів такого руху.
2. Що таке середня швидкість? Як пов'язаний модуль середньої швидкості зі шляхом для прямолінійного руху в одному напрямі?
3. Людина проїхала половину часу автомобілем зі швидкістю $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а половину часу — поїздом зі швидкістю $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Чому дорівнює її середня швидкість за весь час руху? Рух уважайте прямолінійним.
4. Людина проїхала першу половину шляху автомобілем зі швидкістю $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а другу половину шляху — поїздом зі швидкістю $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Чому дорівнює її середня швидкість за весь час руху? Рух уважайте прямолінійним.
5. Що таке миттєва швидкість? За допомогою якого приладу вимірюють миттєву швидкість автомобіля?
6. На рис. 3.5 зображено спідометри автомобілів, що їдуть вулицею міста. Чи порушує водій якогось із цих автомобілів правила дорожнього руху, якщо дозволена швидкість їзди в місті — не більше ніж $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$?

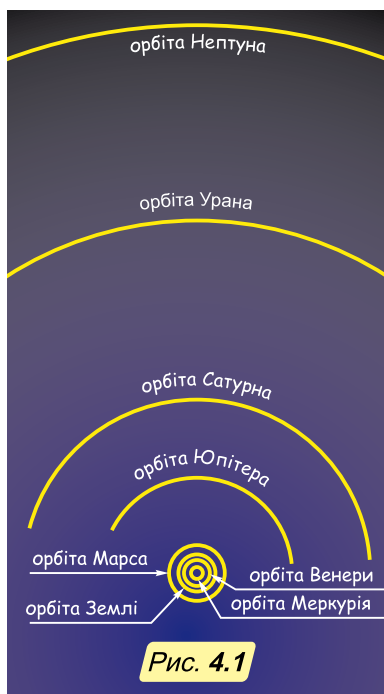
§4

РУХ ПО КОЛУ. ОБЕРТАЛЬНИЙ РУХ

1. Рівномірний рух по колу
2. Період обертання і обертова частота
3. Рух Місяця навколо Землі
4. Обертальний рух

1. РІВНОМІРНИЙ РУХ ПО КОЛУ

Рух тіла називають *рівномірним*, якщо модуль швидкості тіла залишається сталим. Під час рівномірного руху тіло проходить *однаковий шлях* за будь-які однакові проміжки часу.



Рівномірний рух може бути прямолінійним і криволінійним.

Прямолінійний рівномірний рух ми вже розглядали, а тепер перейдемо до розгляду криволінійного рівномірного руху.

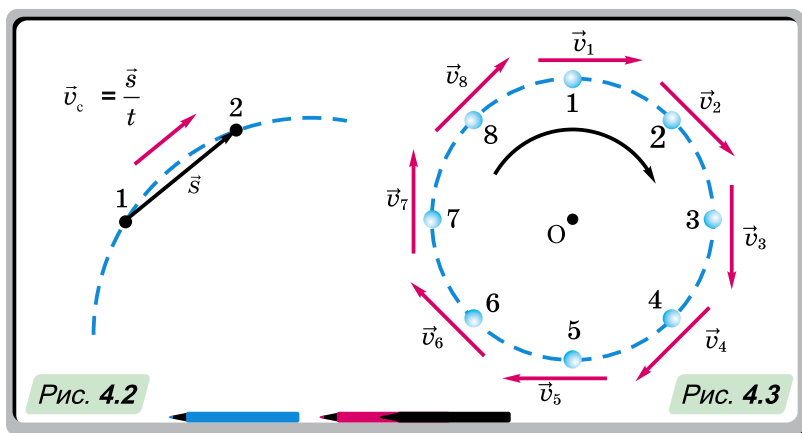
У цьому навчальному році ми обмежимося *рівномірним рухом по колу*.

Таким можна наближено вважати рух Місяця навколо Землі, а також рух планет навколо Сонця. На рис. 4.1 схематично зображено орбіти (або частини орбіт) планет Сонячної системи, причому тут дотримано масштаб — з метою показати, що радіуси орбіт різних планет Сонячної системи відрізняються в десятки разів.

Знайдемо, як напрямлена миттєва швидкість¹ тіла, що рухається по колу. Нехай за малий проміжок часу t тіло

¹ Надалі, кажучи про швидкість, ми завжди матимемо на увазі миттєву швидкість тіла, тобто швидкість у певний момент часу.

перемістилося вздовж кола з точки 1 у точку 2. На рис. 4.2 схематично зображено переміщення тіла \vec{s} . Середня швидкість за цей проміжок часу $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$ напрямлена так само, як переміщення \vec{s} .



Apago PDF Enhancer

Згадаймо тепер, що миттєва швидкість в кожний момент — це середня швидкість тіла за дуже малий проміжок часу, що включає цей момент. Якщо проміжок часу t дуже малий, точки 1 і 2 розташовані дуже близько одна від одної, і тому напрям переміщення \vec{s} , а разом з ним і напрям швидкості, збіжиться з напрямом **дотичної** до кола в цій точці. Отже,



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

На рис. 4.3 зображено швидкість тіла в різних точках траєкторії для рівномірного руху по колу. На рисунках вектор швидкості тіла розташовують поряд із тілом. Зверніть увагу: для рівномірного руху по колу модуль швидкості залишається сталим, але **напрям** швидкості протягом усього часу **змінюється**. А оскільки швидкість є **векторною** величиною, тобто її характеризують не тільки числовим значенням (модулем), а й напрямом, ми доходимо висновку,

що для *рівномірного руху по колу швидкість тіла як векторна величина протягом усього часу змінюється.*

2. ПЕРІОД ОБЕРТАННЯ І ОБЕРТОВА ЧАСТОТА

Рівномірно рухаючись по колу, тіло здійснює кожний наступний оберт за такий самий проміжок часу, що й попередній.

Рух, який повторюється через однакові проміжки часу, називають періодичним.

Періодом обертання T називають проміжок часу, протягом якого тіло здійснює один повний оберт.



Чому дорівнює період обертання годинникової стрілки годинника? Хвилиної? Секундної?

Годинна стрілка робить один повний оберт за 12 год — це період її обертання. Період обертання хвилиної стрілки — 1 год, а секундної — 1 хв.

Чому приблизно дорівнює період обертання Землі навколо Сонця? Місяця навколо Землі?

Період обертання Землі навколо Сонця дорівнює одному року, що становить близько 365 діб. Період обертання Місяця навколо Землі становить близько одного місяця (саме цим зумовлено назву «місяць»).

З періодом обертання T пов'язана *обертova частота*.

Обертova частота n дорівнює кількості повних обертів за одиницю часу.

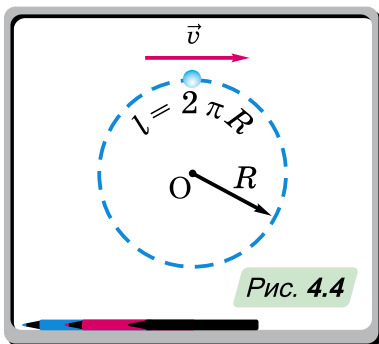


Обертovu частоту в SI вимірюють у $\frac{1}{\text{с}}$. Знайдемо, як пов'язані період і обертova частота. Нехай N повних обертів тіло здійснило за проміжок часу t . Тоді число обертів за секунду $n = \frac{N}{t}$ — це і є обертova частота. Тривалість кожного оберту $T = \frac{t}{N}$. Отже, *період і обертova частота є оберненими*

величинами: $T = \frac{1}{n}$, а $n = \frac{1}{T}$. Наприклад, якщо період обертання збільшиться в 5 разів, то обертова частота в 5 разів зменшиться.

? Як пов'язані період обертання T , швидкість тіла v і радіус R кола для рівномірного руху тіла по колу?

Протягом одного періоду T тіло, рухаючись зі швидкістю v , проходить шлях $l = 2\pi R$, що дорівнює довжині кола (рис. 4.4). Отже, $v = \frac{2\pi R}{T}$. Це співвідношення дозволяє знайти будь-яку з величин T , R і v , якщо ми знаємо дві інші.



3. РУХ МІСЯЦЯ НАВКОЛО ЗЕМЛІ

Місяць рухається навколо Землі по орбіті, яку можна вважати колом, а рух Місяця наближено можна вважати рівномірним.

? З якою швидкістю рухається Місяць по орбіті навколо Землі? Будемо вважати для розрахунку, що період обертання Місяця дорівнює 27 діб, а радіус орбіти Місяця становить 380 000 км.

Скористаємося формулою $v = \frac{2\pi R}{T}$ і виразимо період обертання в секундах.

$$\text{Ми отримаємо: } v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3,8 \cdot 10^5}{27 \cdot 24 \cdot 3600} \approx 10^3 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

4. ОБЕРТАЛЬНИЙ РУХ

Прикладом обертального руху є добове обертання Землі (рис. 4.5), під час якого вона здійснює один оберт навколо своєї осі за добу.



Під час обертального руху тіла всі точки тіла рухаються по колах, причому центри всіх цих кіл лежать на одній прямій, яку називають віссю обертання.

Важливою особливістю обертального руху є те, що **період обертання всіх точок однаковий**, але швидкості різних точок можуть істотно відрізнятись, оскільки різні точки рухаються по колах різних радіусів.

Наприклад, під час добового обертання Землі швидше за інші рухаються точки земної поверхні, розташовані на екваторі, оскільки вони рухаються по колу найбільшого радіуса — радіуса Землі (рис. 4.5).

Точки ж земної поверхні, розташовані на інших паралелях, рухаються з меншими швидкостями, тому що довжина будь-якої з цих паралелей менша за довжину екватора.

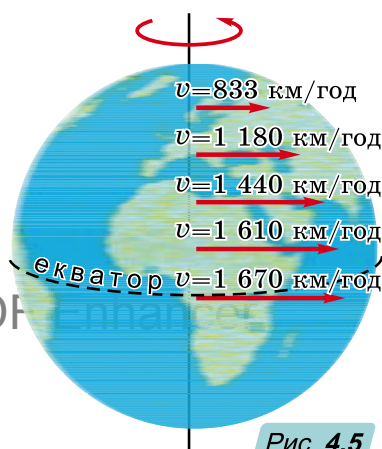


Рис. 4.5



Чому дорівнює швидкість руху точок земної поверхні, розташованих: а) на екваторі; б) на широті Києва (50°); в) на широті 80°? Будемо вважати, що довжина екватора дорівнює 40 000 км, а довжини 50-ї та 80-ї паралелей дорівнюють відповідно 28 000 км і 7 000 км.

Використовуючи формулу $v = \frac{l}{T}$, де l — пройдений шлях (довжина екватора або паралелі), а T — період, який дорівнює одній добі, дістанемо, що вказані точки рухаються зі швидкостями: а) $460 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, б) $320 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, в) $80 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Як напрямлена швидкість при русі по колу?
2. Що таке період і частота обертання? Як вони пов'язані?
3. Як пов'язані період обертання T , швидкість тіла v та радіус R кола при рівномірному русі тіла по цьому колу?
4. З якою швидкістю рухаються кінці годинної, хвилинної та секундної стрілок настінного годинника? Уважайте, що довжина кожної стрілки дорівнює 10 см.
5. У якому напрямі та з якою швидкістю (у кілометрах за годину) мав би рухатися літак уздовж екватора, щоб для його пасажирів Сонце стояло весь час у зеніті?
6. З якою швидкістю рухається Земля навколо Сонця? Вважайте, що радіус орбіти Землі дорівнює 150 мільйонів кілометрів.
7. Що таке обертальний рух? Наведіть приклад такого руху.
8. Під час полярного дня полярник, що перебуває на крижині поблизу від Північного полюса, здійснив «кругосвітню подорож» за одну добу: він ішов по колу з центром у Північному полюсі так, що Сонце протягом усього часу було перед ним. Яким був радіус цього кола, якщо полярник ішов увесь час зі швидкістю $4 \frac{\text{км}}{\text{год}}$?



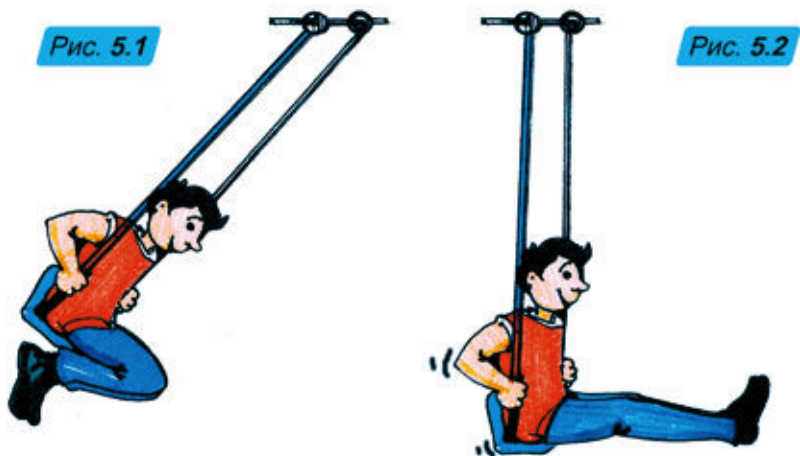
1. Коливальний рух. Амплітуда, період і частота коливань
2. Математичний маятник
3. Пружинний маятник

1. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ. АМПЛІТУДА, ПЕРІОД І ЧАСТОТА КОЛИВАНЬ

Вам, звичайно, не раз доводилося гойдатися на гойдалці.

Придивіться, як саме вона рухається. Коли гойдалка найбільше відхилиться від положення рівноваги, вона на мить зупиниться (рис. 5.1), а потім почне рухатися назад до положення рівноваги.

Досягши положення рівноваги (рис. 5.2), гойдалка пройде його та відхилиться знову від положення рівноваги в другий бік — приблизно на таку саму відстань. Тут вона знову на мить зупиниться, а потім рух гойдалки повториться у зворотному напрямі.



Можна помітити, що рух гойдалки повторюється через *однакові проміжки часу*. Ви вже знаєте, що такий рух називають *періодичним*.

Рух гойдалки — приклад *механічних коливань*.



Механічними коливаннями називають періодичний рух тіла, за якого воно поперемінно відхиляється то в один, то в другий бік від положення рівноваги.

Коливання — *найпоширеніший* у природі вид руху. Прислухайтеся: ви почуєте безліч звуків, а, як ви дізнаєтесь із наступного параграфа, *будь-який* звук створений тілом, *що коливається!* А багато які з тіл коливаються, не утворюючи чутних для нас звуків: так, ми не чуємо коливань молекул у твердих тілах або коливань земної кори.



Найбільше зміщення від положення рівноваги називають амплітудою коливань.

Якщо відпустити гойдалку й поспостерігати деякий час за її коливаннями, то можна помітити, що амплітуда коливань поступово зменшується. Такі коливання називають *затухаючими*. Якщо ж періодично підштовхувати гойдалку, амплітуда її коливань лишатиметься незмінною. Такі коливання називають *незатухаючими*.



Проміжок часу T , протягом якого відбувається одне повне коливання, називають періодом коливань.

Повне коливання здійснюється, наприклад, за той час, коли тіло з одного крайнього положення повертається в *це саме* крайнє положення.



Гойдалка рухалась із крайнього лівого положення в крайнє праве протягом 1,5 с. Чому дорівнює період коливань гойдалки?

За один період коливань гойдалка має пройти від крайнього лівого положення до крайнього правого та *повернутися назад* — від крайнього правого до крайнього лівого положення. Отже, у цьому випадку період дорівнює 3 с.



Частотою коливань ν називають кількість коливань за одиницю часу¹.

¹ Частоту коливань позначають також f .

Період і частота коливань пов'язані співвідношенням $\nu = \frac{1}{T}$. Його можна вивести так само, як і для руху по колу (див. попередній параграф).

Одиницю частоти коливань називають **герц** (Гц): $1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}}$.

За частоти коливань 1 Гц тіло здійснює одне коливання за секунду, а за частоти 1 000 Гц (1 кГц) тіло здійснює 1 000 коливань за секунду.

Розглянемо основні властивості коливань на прикладі **математичного** та **пружинного маятників**.

2. МАТЕМАТИЧНИЙ МАЯТНИК

Розглянемо коливання нитяного маятника — тягарця, підвішеного на нитці. Візьмемо довжину нитки набагато більшою за розміри тягарця, а масу нитки — набагато меншою за масу тягарця (рис. 5.3).

Моделлю такого маятника є «**математичний маятник**». Його можна розглядати як ідеалізацію нитяного маятника, для якого можна знехтувати розмірами тягарця та масою нитки, причому нитка є нерозтяжною.

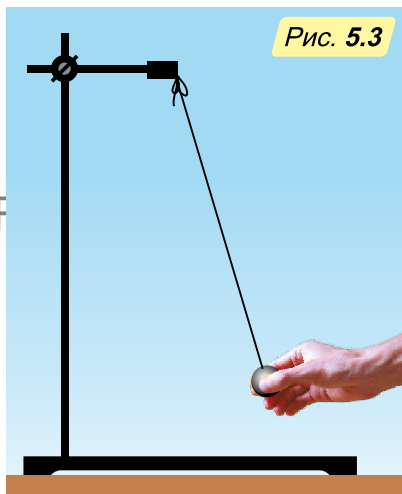


Рис. 5.3

Проведемо дослід



ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ПЕРІОД КОЛИВАНЬ ВІД АМПЛІТУДИ?

Відводячи маятник перед початком коливань на більшу або меншу відстань від положення рівноваги, ми можемо змінювати амплітуду коливань.

Вимірюючи період коливань маятника за різних амплітуд, ми дійдемо висновку, що для **малих коливань**, тобто коли амплітуда коливань набагато менша за довжину нитки, **період коливань маятника практично не залежить від амплітуди!**

Цю чудову властивість коливань маятника відкрив 19-літній Галілей, спостерігаючи за коливаннями підвішених у соборі світильників (рис. 5.4). Час юний Галілей вимірював за власним пульсом, тому що про наручні годинники тоді ще ніхто й не мріяв.

Використовуючи саме це відкриття Галілея, голландський учений Хрістіан Гюйгенс сконструював перший маятниковий годинник, який упродовж кількох століть був найточнішим приладом для вимірювання часу. Його й сьогодні можна побачити в деяких оселях (рис. 5.5).



Рис. 5.4



Рис. 5.5

ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ПЕРІОД КОЛИВАНЬ ВІД МАСИ ТЯГАРЦЯ?

Вимірюючи період коливань маятника за різних мас¹ тягарця, ми виявимо, що *період коливань маятника не залежить від маси тягарця*.

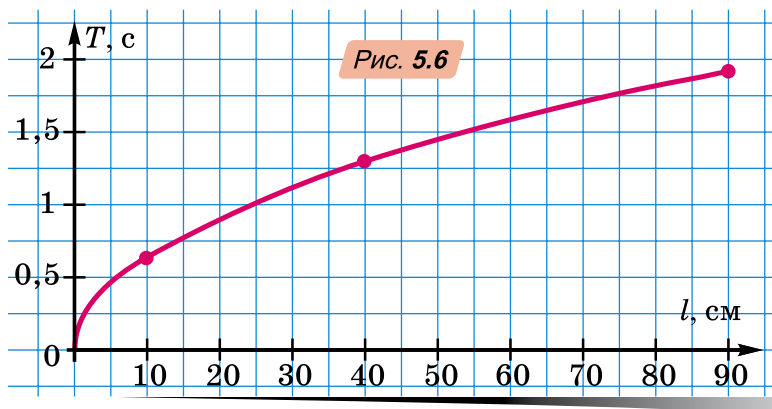
ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ПЕРІОД КОЛИВАНЬ ВІД ДОВЖИНИ НИТКИ?

Вимірюючи період коливань маятника за різних довжин нитки, ми знайдемо, що *зі збільшенням довжини нитки період коливань збільшується*.

¹ Перші відомості про масу тіла містились у курсі фізики 7-го класу та курсі природознавства. Докладніше з поняттям маси ви познайомитесь далі.



На графіку (рис. 5.6) точками відмічено виміряні на досліді значення періоду коливань маятника при декількох значеннях довжини нитки. Який висновок можна зробити на основі експериментальних даних про характер залежності періоду від довжини нитки?



У разі збільшення довжини нитки в 4 рази період коливань збільшується вдвічі, а в разі збільшення довжини нитки в 9 разів період коливань збільшується втричі. Це дозволяє припустити, що **період коливань математичного маятника пропорційний кореню квадратному з довжини нитки**.

Теоретичні розрахунки підтверджують це припущення: кривою на рис. 5.6 зображено графік залежності $T(l)$.

САМОРОБНИЙ СЕКУНДОМІР

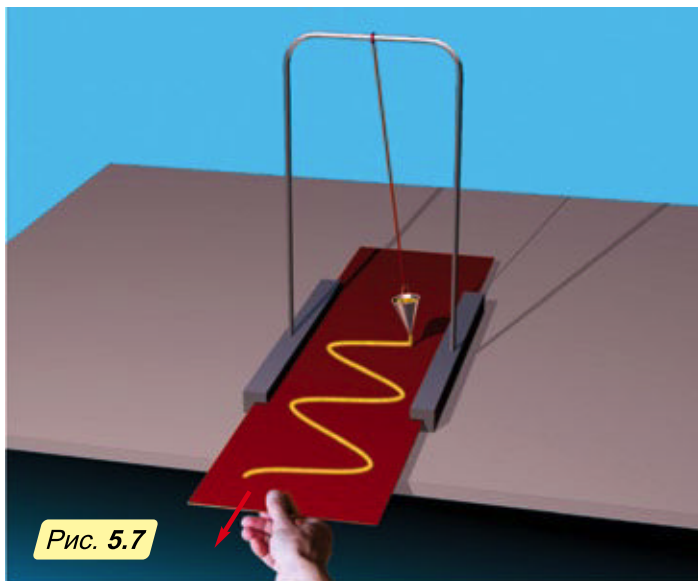
Перевірте самі вдома, що період коливань маятника з довжиною нитки 1 м з великою точністю дорівнює 2 с. Отже, такий маятник проходить положення рівноваги з інтервалом 1 с.

Цей «подарунок природи» дозволяє вам виготовити за допомогою лінійки та тягарця досить точний секундомір буквально за лічені секунди!

ЗАПИС КОЛИВАЛЬНОГО РУХУ

Візьмімо за тягарець для маятника невелику посудину у формі перевернутого конуса з малим отвором у вершині. Насиплемо в посудину дрібного сухого піску. Під час ко-

ливань маятника пісок, висипаючись тонким струменем, «креслитиме» на аркуші картону, що рівномірно рухається, графік залежності зміщення тягарця від часу (рис. 5.7). Такий хвилеподібний графік називають **синусоїдою**. Її властивості ви вивчатимете в старших класах.



3. ПРУЖИННИЙ МАЯТНИК

Другим наочним прикладом коливань можуть бути вертикальні коливання тягарця, підвішеного на пружині. Це — **пружинний маятник** (рис. 5.8). Властивості пружинного маятника істотно відрізняються від властивостей математичного маятника, але одна дуже важлива властивість є для них спільною. З неї ми й почнімо.

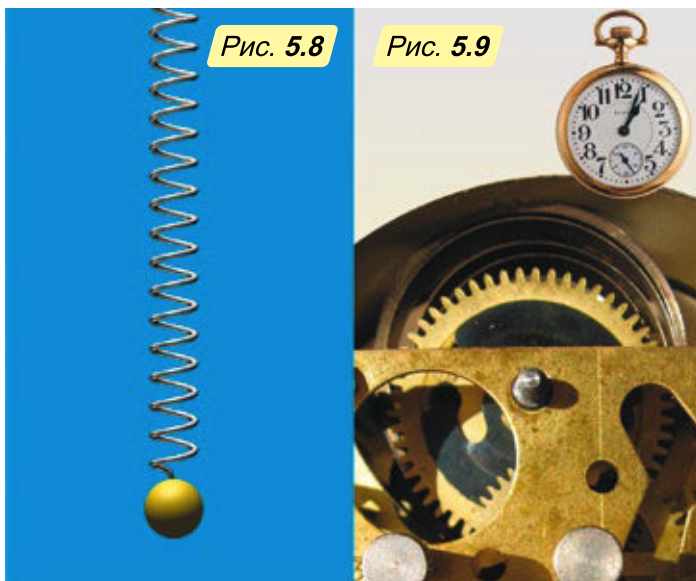


Проведемо дослід

ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ПЕРІОД КОЛИВАНЬ ВІД АМПЛІТУДИ?

Вимірюючи період коливань пружинного маятника для різних амплітуд, ми помітимо, що так само, як і для математичного маятника, **період коливань практично не залежить від амплітуди!**

Оце і є головна **спільна** властивість пружинного й математичного маятників. Її також було використано для конструювання годинників, де пружини згорнуто в тугі спіралі: на рис. 5.9 показано пружинний годинник та пружину в ньому (збільшено).



ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ПЕРІОД КОЛИВАНЬ ВІД МАСИ ТЯГАРЦЯ?

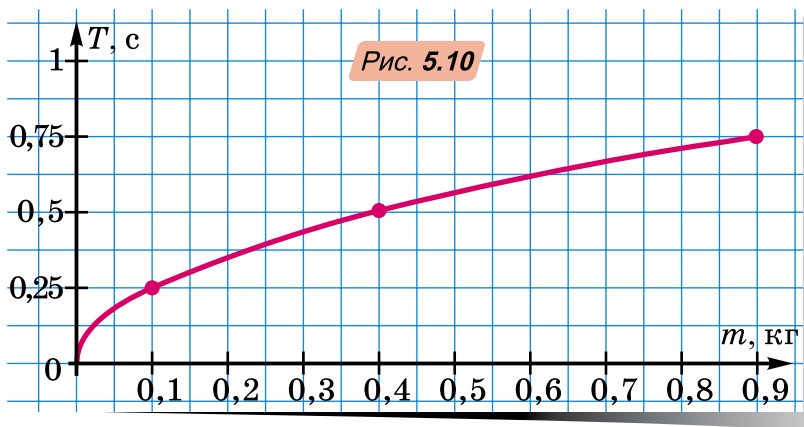
Вимірюючи період коливань маятника для різних мас тягарця, ми виявимо: що більша маса тягарця, то більший період коливань.



На графіку (рис. 5.10) відмічено виміряні на досліді значення періоду коливань певного пружинного маятника для кількох значень маси тягарця. Який висновок можна зробити на підставі експериментальних даних про характер залежності періоду від маси тягарця?

У разі збільшення маси в 4 рази період коливань збільшується вдвічі, а в разі збільшення маси в 9 разів період коливань збільшується втричі. Це дозволяє припустити, що **період коливань пружинного маятника пропорційний кореню квадратному з маси тягарця**.

Теоретичні розрахунки підтверджують це припущення: кривою на рис. 5.10 зображено графік залежності $T(m)$.



Крім того, період коливань пружинного маятника залежить також від властивостей пружини: що «м'якша» пружина, тобто що більше видовження пружини під дією тої самої сили, то більший період коливань.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Що таке коливальний рух? Наведіть приклади коливальних рухів.
2. Що таке період і частота коливань? Як вони пов'язані одне з одним?
3. Тіло здійснило 100 коливань за 20 с. Чому дорівнюють період і частота коливань?
4. Які основні властивості математичного маятника? Де їх використовують?
5. Які основні властивості пружинного маятника? Де їх використовують? Що спільного у пружинного та математичного маятників?
6. Скільки разів протягом одного періоду маятник проходить положення рівноваги?
7. Період коливань маятника дорівнює 3 с. За який проміжок часу він проходить від найбільшого відхилення до положення рівноваги?
8. Після того як гойдалку відхилили, вона першого разу пройшла положення рівноваги через 1 с. Яка частота коливань гойдалки?

1. Джерела звуку
2. Поширення звуку
3. Гучність, висота й тембр звуку
4. Відбиття звуку
5. Нечутні звуки

Хочеш дізнатися більше?

Що спільного у кажана й підводного човна?

1. ДЖЕРЕЛА ЗВУКУ

Прислухайтесь: звідусіль ми чуємо різноманітні **звуки**. Це звуки голосів, спів пташок, звуки радіо, телевізора та музичних інструментів, грім, шум міського транспорту, вітру в листі, дощу.

Завдяки чому ж виникає звук? Як він поширюється? Чому ми його чуємо?

Проведемо дослід



Зачепіть пальцем гітарну струну, і ви почуєте звук, який триватиме деякий час. Придивіться під час цього звучання до струни: вона ніби втратить чіткі обриси, стане розмитою (третя струна зверху на рис. 6.1). Пояснюється це тим, що струна **коливається** з великою частотою. Тільки-но ви зупините струну рукою, її обриси одразу ж стануть чіткими, а звук припиниться.

Для другого дослідів виберемо металевий таз. Якщо ви вдарите у дно таза, то почуєте голосний звук. На цей раз коливань таза не видно. Але піднесіть до нього підвішену на нитці кульку для настільного тенісу. Як тільки кулька торкається таза, вона відскакує вбік — це і свідчить про те, що таз коливається.

Отже, проведені нами дослідів дозволяють зробити висновок, що

джерелами звуків є тіла, що коливаються.



Наша натягнута нитка та каstrуля — прообрази різних музичних інструментів.



Рис. 6.1



Рис. 6.2

Створюючи музичні інструменти, натягнуті струни кріплять на дерев'яному корпусі спеціальної форми, завдяки чому звук струн значно посилюється й отримує красиве звучання. Цей дерев'яний корпус називають декою. Форма та матеріал деки відіграють дуже велику роль у звучанні інструмента.

Таз — прообраз ударних інструментів, таких як барабан або музичні тарілки (рис. 6.2).

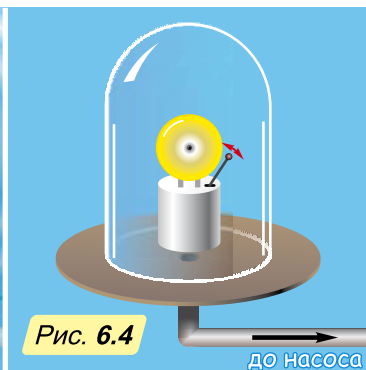
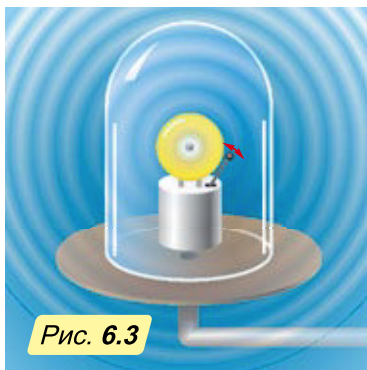
2. ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ

Як же звук досягає наших вух?

Проведемо дослід



Помістимо під ковпак повітряного насоса електричний дзвінок на поролоновій подушечці. Увімкнемо дзвінок — його буде добре чути. Але коли ми почнемо відкачувати повітря з-під ковпака, звук ставатиме тихішим і тихішим, хоча крізь скло добре видно, що молоточок продовжує ударяти в чашку дзвінка. Схематично випадки, коли звук чути та коли його майже не чути, зображено відповідно на рис. 6.3 і 6.4.



Цей дослід доводить, що



для поширення звуку необхідно середовище.

Часто цим середовищем є **повітря**. Відпомпувавши повітря з-під ковпака, ми розірвали «повітряний зв'язок» між дзвінком і вухом — і перестали чути звук дзвінка.

«Велике безгоміння» космосу зумовлено тим, що звук не поширюється в порожнечі. А от світло, навпаки, найкраще поширюється саме в порожнечі. Тому ми добре бачимо зорі, але зовсім не чуємо гуркоту космічних катастроф — наприклад, коли вибухають зорі.

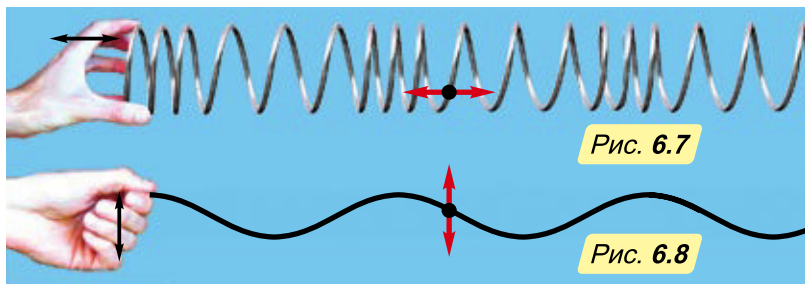
ХВИЛІ

Згадаймо, що джерелами звуку є тіла, що коливаються. Під час коливань тіло створює **згущення та розрідження повітря**, які поширюються в просторі у формі **хвиль**. На рис. 6.5 схематично зображено, як звукова хвиля поширюється від джерела звуку.

Звукові хвилі можна тільки почути, але вам, звичайно, знайомі й видимі хвилі — на поверхні води (рис. 6.6).

Звукові хвилі в повітрі називають **поздовжніми**, тому що під час поширення хвилі частинки повітря коливаються **вздовж** напрямку поширення хвилі. Поздовжні хвилі можуть поширюватися в будь-якому тілі: наприклад, на рис. 6.7 показано, як коливаннями руки можна створити поздовжні хвилі розтягування і стиснення в пружині.

У твердих тілах можуть поширюватися не тільки поздовжні, а й **поперечні** хвилі, коли частинки, з яких складається тіло, коливаються в напрямі, **перпендикулярному** до напрямку поширення хвилі. На рис. 6.8 показано, як коливаннями руки створити поперечні хвилі у шнурі.



ШВИДКІСТЬ ЗВУКУ

Швидкість поширення звукових хвиль у середовищі називають **швидкістю звуку** в цьому середовищі.

У таблиці наведено приблизні значення швидкості звуку в різних середовищах.

Речовина	Швидкість звуку, $\frac{м}{с}$	Речовина	Швидкість звуку, $\frac{м}{с}$
Повітря	340	Скло	4 500
Вода	1 500	Сталь	5 000
Поліетилен	2 000	Алмаз	18 350

Ми бачимо, що швидкість звуку в різних середовищах відрізняється в десятки разів. Можна помітити, що швидкість звуку в рідинах набагато більша, ніж у газах, а в твердих тілах — іще більша. І що твердіше тіло, то більша швидкість звуку в ньому: найбільша швидкість звуку в найтвердішій із відомих речовин — алмазі.



Спостерігаючи здалеку за рухами людини, яка працює молотком або сокирою, можна помітити, що звук удару чути не в самий момент удару, а трохи пізніше — коли людина піднімає руку з молотком після удару. Як це пояснити?

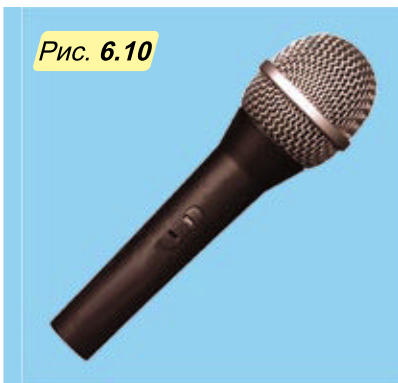
Звук поширюється зі швидкістю, приблизно в мільйон разів меншою за швидкість світла, тому удари ми «бачимо» практично миттєво, а звук удару запізнюється.

ПРИЙМАЧІ ЗВУКУ

Найважливішим для нас приймачем звуку є, звичайно, власне вухо. На рис. 6.9 схематично зображено будову вуха. Звукова хвиля, потрапляючи на барабанну перетинку (на рисунку виділено білим), викликає її коливання. Ці коливання через мініатюрні кісточки, які називають молоточком (виділено жовтим) і ковадлом (виділено червоним), передаються в наповнений рідиною завиток (виділено зеленим). Тут виникають хвилі, які діють на чутливі клітини, де народжуються нервові імпульси, що йдуть до мозку. Саме ці імпульси мозок і сприймає як звук.

Вухо є надзвичайно чутливим інструментом: воно здатне сприймати звуки, що відрізняються за інтенсивністю

в 10^{14} разів, тобто в сто мільйонів мільйонів (саме так!) разів. Наприклад, у стільки разів відрізняється інтенсивність звуку тихого шепоту від інтенсивності звуку відбійного молотка або рок-концерту.



Але вухо, цей чудовий «подарунок природи», вимагає бережного ставлення до себе. У разі тривалої дії надто голосного звуку чутливість вуха погіршується **необоротно**. Тому той, хто часто слухає рок-концерти, може вже **ніколи** не почути перегук птахів у ранковому лісі або лагідного шепоту коханої чи коханого.

Нині створено й штучні приймачі звуку — **мікрофони** (рис. 6.10). Вони перетворюють звукові коливання в коливання електричного струму, завдяки чому можна записувати звук, а також передавати його на великі відстані (на цьому ґрунтується дія радіо й мобільного телефону).

3. ГУЧНІСТЬ, ВИСОТА Й ТЕМБР ЗВУКУ



Проведемо досліді

Візьмемо камертон — прилад, який нагадує масивну виделку з двома ніжками, закріплену на дерев'яному корпусі (рис. 6.11). Якщо вдарити по ніжці камертона гумовим молоточком, ніжки почнуть коливатися й ми почуємо звук. Прикріпимо до ніжки камертона вістря і, вдаривши по ніжці, швидко проведемо вістря по закопченому склу.

Ми побачимо знайомий хвилеподібний слід, зображений на рис. 6.12 і дуже схожий на пісковий слід нитяного маятника. Це — запис звукових коливань камертона.

Зіставляючи гучність звучання камертона з амплітудою його коливань, ми помітимо: що гучніше звучить камертон, то більша амплітуда коливань його ніжок. Отже,



Рис. 6.11



гучність звуку визначає амплітуда коливань тіла.

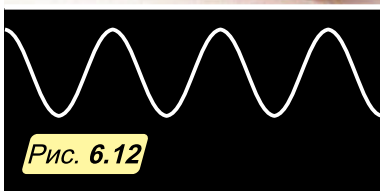


Рис. 6.12

Візьмемо тепер два камертони, що відрізняються розмірами. Ми помітимо, що менший камертон видає вищий звук, ніж більший камертон. Вимірювання показують, що частота коливань меншого камертона також більша. Отже,

висоту звуку визначає частота коливань: що більше частота, то вище звук.



Людське вухо сприймає звукові коливання з частотою від 16 Гц до 20 000 Гц. Частота звуку людського голосу становить від 80 Гц (низький бас) до 1 400 Гц (найвищий жіночий голос — колоратурне сопрано).

Але звуки, які мають навіть однакові гучність і висоту, можуть значно відрізнятися. Наприклад, звук скрипки легко відрізнити від звуку труби тої самої гучності та частоти. Якість звуку, що визначає його характерне забарвлення, називають **тембром**. Тембр звуку визначається наявністю коливань з вищими частотами, кратними основній частоті звуку.

4. ВІДБИТТЯ¹ ЗВУКУ

Усім вам, звичайно, доводилося чути луна — у лісі, у горах і навіть у приміщенні. Луна — результат відбиття звуку:

¹ Процес називають *відбиванням*, явище — *відбиттям*, а його наслідок — *відбитком*.

звукові хвилі відбиваються від різних перешкод — навіть від хмар! Іноді можна почути й багаторазову луну — результат кількох відбиттів. Про те, хто і як використовує відбивання звуку, ми розповімо в розділі «Хочеш дізнатися більше?».



Якщо блискавка вдарила недалеко від вас, ви чуєте різкий одноразовий удар грому, а якщо блискавка була далекою, ви чуєте тривалі розкоти грому. Чому?

Звук далекої блискавки багаторазово відбивається від хмар.

Якщо людина хоче, щоб її голос можна було почути на великій відстані, вона приставляє до рота дві долоні так, щоб звук голосу йшов між ними. Чим це пояснити?

Унаслідок відбиття від долонь звук голосу поширюється у вузькому конусі. У цьому конусі інтенсивність звуку посилюється, а в інших напрямках слабшає.

5. НЕЧУТНІ ЗВУКИ

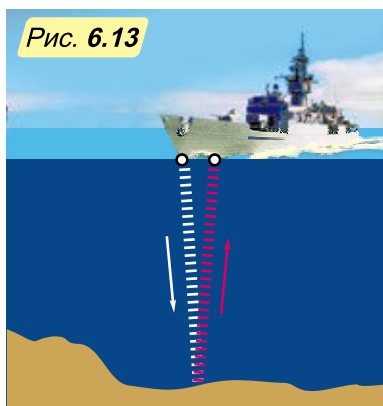
Тіла, що коливаються з частотою понад 20 000 Гц, випромінюють **ультразвук**. Людина не чує його, але деякі тварини чують так, собаки чують коливання з частотою до 60 000 Гц, а дельфіни — навіть до 200 000 Гц.

Ультразвук широко застосовують у різних галузях.

Наприклад, за допомогою ультразвуку вимірюють глибину моря. З корабля посилають ультразвуковий сигнал і вимірюють проміжок часу, що минув до повернення сигналу, відбитого від дна (рис. 6.13).

Знаючи швидкість звуку у воді, можна визначити відстань до дна. Прилад для вимірювання глибини називають **ехолотом**.

За допомогою ультразвуку «просвічують» металеві вироби для виявлення в них прихованих дефектів — сторонніх вкраплень, тріщин або пустот.



Ультразвук широко використовують і в медицині — як для обстеження хворого, так і для лікування. Наприклад, ультразвуковому дослідженню внутрішніх органів (УЗД) віддають часто перевагу над рентгенівським, оскільки воно безпечніше для організму. Лікування ультразвуком ґрунтується, зокрема, на тому, що він викликає внутрішнє розігрівання тканин організму.

Тіла, що коливаються з частотами, меншими за 20 Гц, випромінюють **інфразвук**. Інфразвук викликають, наприклад, землетруси та вібрація важких механізмів. Людина не чує інфразвук вухом, але сприймає його всім організмом як неприємне відчуття. Можливо, інфразвук чують деякі тварини: так, відомо, що собаки і кішки «передбачають» землетрус і намагаються вийти з дому.

Хочеш дізнатися більше?



ЩО СПІЛЬНОГО У КАЖАНА Й ПІДВОДНОГО ЧОВНА?

Кажани живуть часто у повній темряві — наприклад, у печерах. Учені встановили, що кажани орієнтуються й полюють, випускаючи ультразвук і ловлячи його відбиток своїми величезними вухами (рис. 6.14).

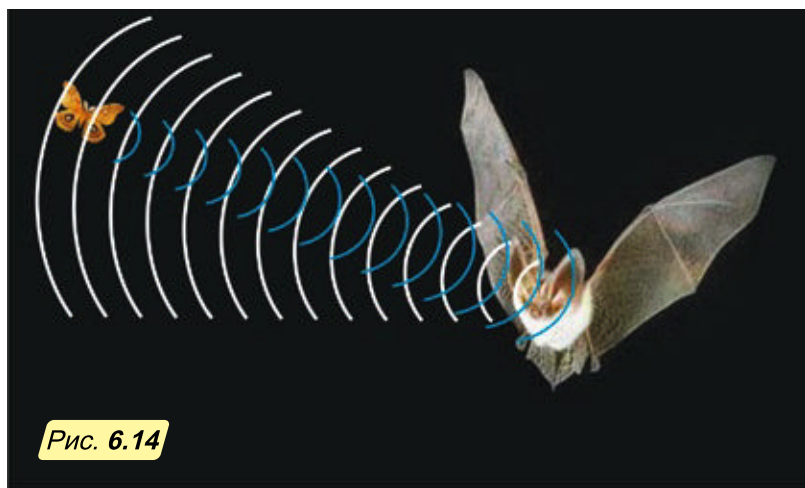


Рис. 6.14

Підводні човни також рухаються в темряві: на глибині, де вони плавають, завжди темно, як у безмісячну ніч. Тому, подібно до кажанів, підводні човни орієнтуються, визначаючи відстані до предметів за відбитими ультразвуковими імпульсами.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які тіла є джерелами звуку?
2. Чому для поширення звуку необхідно середовище?
3. Які ви знаєте типи хвиль? До якого типу хвиль належать звукові хвилі в повітрі?
4. Чому дорівнює швидкість звуку в повітрі? У яких середовищах швидкість звуку найменша? Найбільша?
5. Ви почули гуркіт грому через 10 с після спалаху блискавки. На якій відстані від вас була ця блискавка?
6. Які ви знаєте приймачі звуку?
7. Що визначає гучність і висоту звуку?
8. Звуки, що видають під час польоту комахи, спричинені змахами їхніх крилець. Чому комар «пищить», муха «дзижчить», а джміль «гуде»?
9. Де і як використовують відбивання звуку?
10. Що таке ультразвук? Як його використовують?
11. Відбитий сигнал ехолота повернувся за 6 с після відправлення сигналу. Яка глибина моря в цьому місці?

- Механічним рухом називають змінювання з часом положення тіл у просторі відносно інших тіл.
- Рух і спокій відносні: казати про рух або спокій якого-небудь тіла можна тільки відносно іншого тіла.
- Траєкторією руху тіла називають лінію, уздовж якої рухається тіло.
- Прямолінійним рухом називають рух тіла, коли його траєкторія є відрізком прямої.
- Траєкторія руху тіла залежить від того, відносно якого тіла розглядають цей рух.
- Якщо кінцеве положення тіла збігається з початковим, траєкторію руху називають замкнутою.
- Довжину траєкторії називають шляхом, пройденим тілом (або, для стислості, просто шляхом).
- Переміщенням тіла називають напрямлений відрізок, проведений від початкового положення тіла до його положення в певний момент часу. Переміщення є векторною величиною, тобто його характеризують числовим значенням (модулем) і напрямом.
- Прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого тіло за будь-які однакові проміжки часу здійснює однакові переміщення.
- Швидкістю \vec{v} прямолінійного рівномірного руху називають відношення переміщення \vec{s} до проміжку часу t , за який відбулося це переміщення: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$. Швидкість є векторною величиною.
- Рух, під час якого тіло проходить за однакові проміжки часу різний шлях, називають нерівномірним.
- Середньою швидкістю \vec{v}_c за певний проміжок часу t називають відношення переміщення \vec{s} за цей проміжок часу до проміжку часу: $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$.
- Рух тіла називають рівномірним, якщо модуль швидкості тіла залишається сталим.

- Під час руху по колу швидкість у будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до кола в цій точці.
- Періодом обертання T називають проміжок часу, протягом якого тіло здійснює один повний оберт. Обертова частота n дорівнює кількості повних обертів за одиницю часу. Період і частота пов'язані співвідношенням $n = \frac{1}{T}$.
- Період обертання T , швидкість тіла v і радіус R кола для рівномірного руху тіла по колу пов'язані співвідношенням $v = \frac{2\pi R}{T}$.
- Під час обертального руху тіла всі його точки рухаються по колах, причому центри всіх цих кіл лежать на одній прямій, яку називають віссю обертання.
- Механічними коливаннями називають періодичний рух тіла, за якого воно поперемінно відхиляється то в один, то в другий бік від положення рівноваги. Найбільше зміщення від положення рівноваги називають амплітудою коливань.
- Періодом коливань називають проміжок часу T , протягом якого відбувається одне повне коливання. Частотою коливань ν називають кількість коливань за одну секунду. Період і частота пов'язані співвідношенням $\nu = \frac{1}{T}$.
- Період коливань математичного маятника пропорційний кореню квадратному з довжини нитки.
- Період коливань пружинного маятника пропорційний кореню квадратному з маси тягарця.
- Джерелами звуків є тіла, що коливаються.
- Для поширення звуку необхідно середовище.
- Гучність звуку визначає амплітуда коливань тіла, а висоту — частота коливань.
- Людське вухо сприймає звукові коливання з частотою від 16 Гц до 20 кГц.

РОЗДІЛ 2 ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ

§ 7. Взаємодія тіл. Закон інерції

§ 8. Взаємодії та сили. Сили пружності

§ 9. Сила тяжіння. Вага й невагомість

§ 10. Сили тертя

§ 11. Момент сили. Важіль і блок

§ 12. Тиск твердих тіл і рідин

§ 13. Тиск газів.

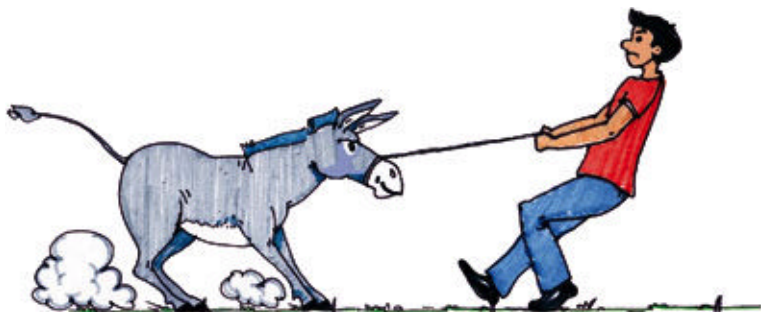
Закон Паскаля для рідин і газів

§ 14. Атмосферний тиск

§ 15. Виштовхувальна сила.

Закон Архімеда

§ 16. Плавання тіл



1. Як виявляє себе взаємодія тіл?
2. Закон інерції
3. Маса

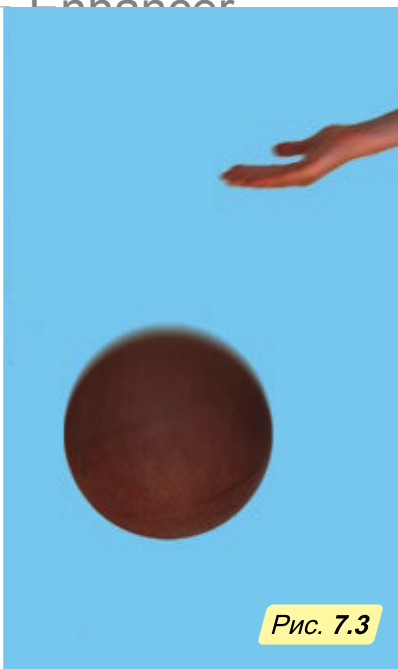
1. ЯК ВИЯВЛЯЄ СЕБЕ ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ?

Спостереження свідчать, що тіла взаємодіють між собою. У чому ж виявляється ця взаємодія і чи завжди вона помітна?



Проведемо досліди

Штовхніть м'яч, який лежить на траві, — він зрушить з місця (рис. 7.1). Отже, *у результаті дії на тіло його швидкість може змінитися.*



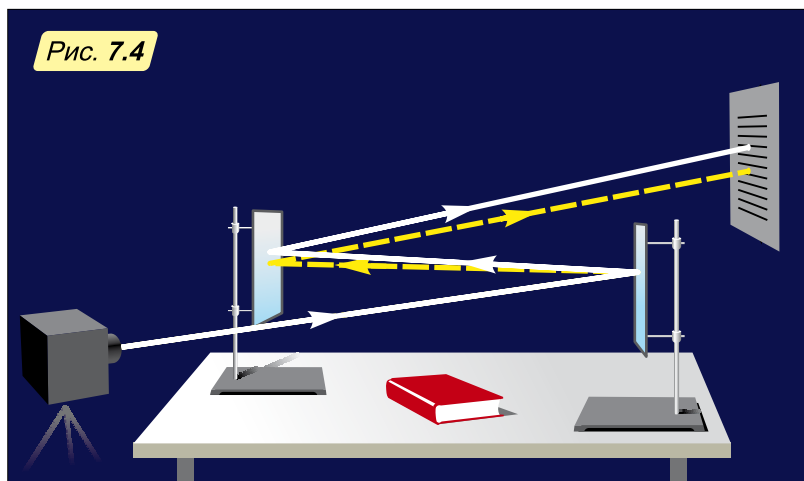
Штовхаючи м'яч, ви, напевно, відчули, що й м'яч теж «штовхнув» вашу ногу? Це — загальна закономірність: тіла завжди діють *одне на одне*, тобто **ВЗАЄМОдіють**.

А чи діяли на м'яч інші тіла, коли він лежав на траві? Щоб відповісти на це запитання, покладіть м'яч на долоню (рис. 7.2). Ви відчуєте, що м'яч *тисне* на долоню. А оскільки тіла завжди **взаємодіють**, то й долоня тисне на м'яч. Висмикніть долоню з-під м'яча — він почне падати (рис. 7.3). Отже, коли м'яч лежав на долоні, вона *підтримувала* його, тиснучи на нього знизу вгору.

Наш дослід свідчить, що навіть коли тіло перебуває у спокої, тобто його швидкість не змінюється, це ще не означає, що на нього не діють інші тіла. А чи можна цю взаємодію тіл зробити помітною?

Покладіть м'яч на поролонову подушечку. Унаслідок того, що м'яч на неї тисне, подушечка стиснеться, тобто змінить форму. Зміну форми називають **деформацією**. Отже, *у результаті взаємодії тіла можуть деформуватися*.

Деформація тіл у разі їхньої взаємодії не завжди помітна: наприклад, якщо покласти книжку на стіл, ми не помітимо деформації стола. На рис. 7.4 зображено схему досліду, який доводить, що стіл усе ж таки прогинається під книжкою, — це видно завдяки зміщенню «зайчиків» від дзеркал. Отож не завжди можна довіряти лише органам чуття!



Досі ми розглядали переважно взаємодію тіл, що контактують одне з одним. Але згадайте: коли ви прибрали долоню з-під м'яча, він почав *падати*, тобто його швидкість почала *змінюватися*.

Але ж під час падіння м'яча ніяке тіло до нього не торкається! Взаємодія з яким же тілом є причиною зміни його швидкості?

У другій половині 17-го століття англійський учений Ісак Ньютон здогадався, що причиною зміни швидкості тіл під час падіння є *притягання їх Землею*. Воно діє *на відстані*: Земля притягає тіла не тільки поблизу її поверхні — притягання Землі сягає набагато далі. Саме воно, подібно до туго натягнутого каната, утримує Місяць на його коловій орбіті навколо Землі. Якщо б це притягання раптом зникло, то Місяць у ту саму мить полетів би в космічний простір!

Отже, наші досліди та спостереження свідчать, що *внаслідок взаємодії тіл може змінюватися їхня швидкість, а також тіла можуть деформуватися*.

Звідси випливає, що *зміна швидкості тіла або його деформація можуть бути мірою дії на це тіло інших тіл*. Цей важливий висновок незабаром нам знадобиться.

2. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ

Ми бачили, що коли на тіло діють інші тіла, його швидкість може змінитися.

А як рухатиметься тіло, якщо на нього *не діють* інші тіла? І взагалі, чи буде воно в такому разі *рухатися* або може тільки *перебувати у спокої*?

Тривалий час уважали: коли на тіло не діють інші тіла, воно може тільки перебувати у спокої. Люди бачили, що тіла, які їх оточують, не рухаються «самі собою». Так, віз рухається тільки за умови, що його тягне кінь (рис. 7.5), а листя на деревах тріпотить тільки завдяки вітру. Тільки-но кінь перестає тягти воза, той зупиняється, тільки-но стихає вітер — листя завмирає.

Виходячи з цих *спостережень*, давньогрецький учений Арістотель стверджував, що «тіло рухається тільки тоді,

коли його щось рухає». Такого уявлення про рух дотримувалися близько двох тисяч років, доки його не піддав сумніву італійський учений Галілео Галілей.

Він перейшов від спостережень до **дослідів**.

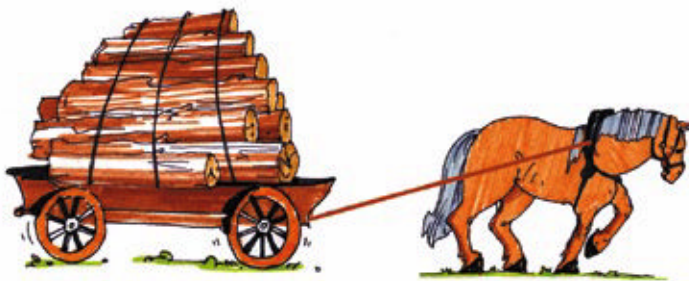


Рис. 7.5

Проведемо досліді



Повторимо досліді, які привели Галілея до відкриття першого закону механіки **закону інерції**.

Штовхніть кулю, що лежить на горизонтальній поверхні стола. Куля покотиться, але не зупиниться **відразу** після того, як ви відірвете руку від неї, а буде **рухатися** після цього ще деякий час. Цей простий дослід переконливо доводить, що тіло може рухатися й тоді, коли його не «рухає» якесь інше тіло!

Простежте тепер за рухом кулі по столу: швидкість її зменшується, і врешті-решт куля зупиняється, тобто, рухаючись по столу, куля **змінює** свою швидкість. І Галілей припустив, що ця зміна швидкості кулі також є результатом дії іншого тіла, а саме результатом **тертя** кулі об поверхню стола.

Скочуючи кулю з тієї самої похилої площини, Галілей помітив: що менше тертя, тобто що твердіше та гладше горизонтальна поверхня, то довше по ній котиться куля. Так, по посипаній піском поверхні куля прокотиться зовсім небагато (рис. 7.6), по покритій тканиною поверхні прокотиться довше (рис. 7.7), а по гладенькому склу котитиметься дуже довго (рис. 7.8).

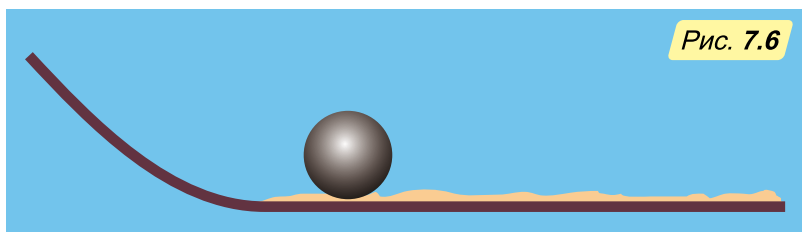


Рис. 7.6

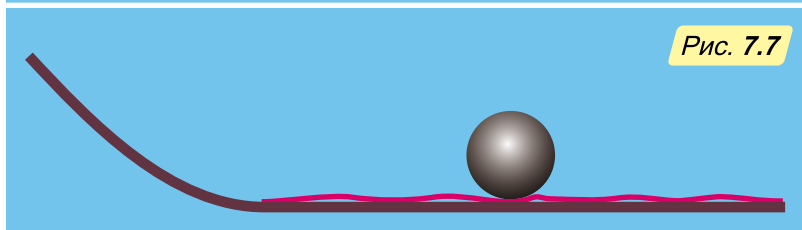


Рис. 7.7



Рис. 7.8

Зі своїх дослідів Галілей зробив геніальний висновок: якби тертя не було **зовсім**, куля котилася б із незмінною швидкістю **вічно**!

Так Галілей відкрив перший закон механіки, який називають **законом інерції**:



якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається зі сталою за модулем і напрямом швидкістю або зберігає стан спокою.

З хорошою точністю можна вважати, що закон інерції виконується для руху тіл відносно **Землі**.

Здатність тіла зберігати свою швидкість незмінною, якщо на нього не діють інші тіла, називають **явищем інерції**.

3. МАСА

Як ви вже знаєте, тіло змінює швидкість тільки за умови, що на нього діє якесь інше тіло. Неважко помітити, однак, що внаслідок тієї самої дії швидкості різних тіл

змінюються по-різному. Наприклад, той самий поштовх надає порожньому візкові, що стоїть на столі, більшої швидкості, ніж навантаженому.

Властивість тіла, що визначає, як змінюється його швидкість внаслідок тієї самої дії, називають **інертністю**: що більша інертність тіла, то менше змінюється швидкість тіла.

Наприклад, інертність навантаженого візка більша, ніж порожнього, маса справжнього автомобіля в багато разів більша, ніж іграшкового.

Мірою інертності тіла є його **маса**: що більша маса тіла, то важче змінити його швидкість на ту саму величину (наприклад, на $1 \frac{м}{с}$). Отже, маса навантаженого візка більша, ніж маса порожнього.

Одиницею маси в SI є 1 кілограм (кг). Це — маса еталона (зразка), яким є виготовлений зі спеціального сплаву циліндр, що зберігається в Міжнародному бюро мір і ваги у Франції.

Наближено можна вважати, що 1 кг дорівнює масі 1 л прісної води (тому й було вибрано таку одиницю маси: її легко відтворити з точністю, достатньою для багатьох випадків).

Нерідко використовують також такі одиниці маси: 1 грам (г), що дорівнює 0,001 кг, та 1 тонну (т), що дорівнює 1000 кг.

Проведемо дослід



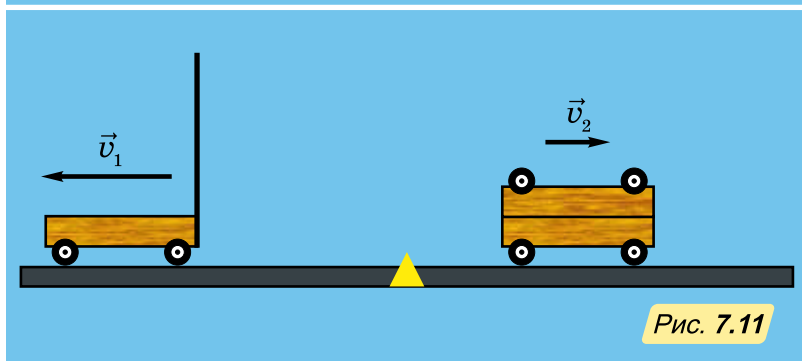
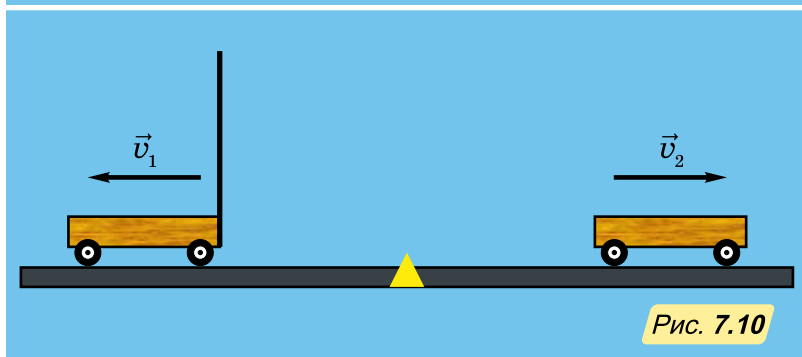
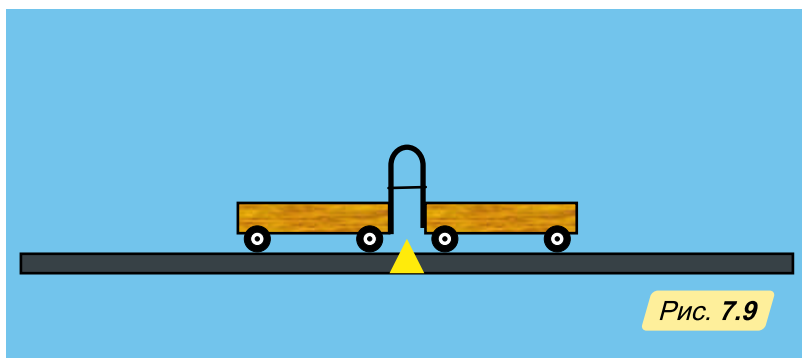
Маси двох тіл можна порівняти, якщо вимірити, як змінюються швидкості тіл унаслідок їхньої взаємодії.

Візьмемо два однакові візки. На одному з них закріпимо пружину, зігнемо її та зафіксуємо в такому стані за допомогою нитки (рис. 7.9).

Поставимо візки поряд впритул і перепалимо нитку. Розігнувшись, пружина розштовхне візки. Виміри показують, що візки при цьому набувають однакових за модулем, але протилежно напрямлених швидкостей (рис. 7.10).

Повторимо дослід, помістивши на один із візків ще один **такий самий** візок. Виміри показують, що в такому

разі навантажений візок набере *вдвічі меншої* швидкості, ніж порожній (рис. 7.11). Причиною цього є те, що навантажений візок має *вдвічі більшу масу*.



За відношенням швидкостей, яких набувають нерухомі спочатку тіла в результаті їхньої взаємодії, можна **порівнювати** маси цих тіл: якщо два нерухомі спочатку тіла

набули внаслідок взаємодії **одне з одним** швидкостей v_1 і v_2 , то $\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}$, тобто **відношення мас обернене відношенню швидкостей**.

А якщо маси тіл можна порівнювати, то їх можна й **вимірювати**, тому що вимірити фізичну величину — це порівняти її з одиницею цієї величини (у випадку вимірювання маси — з еталоном маси або його копією).

Але на практиці маси вимірюють значно простіше — за допомогою зважування. Про це ми розповімо далі.

Запитання та завдання для самоперевірки



1. У чому виявляється взаємодія тіл? Наведіть декілька прикладів, які ілюструють вашу відповідь.
2. Як може рухатися тіло, якщо на нього не діють інші тіла?
3. Сформулюйте закон інерції. Хто його відкрив?
4. Чому віз зупиняється, коли його перестає тягти кінь? Чому листя замирає, коли стихає вітер?
5. Що таке явище інерції? Опишіть декілька прикладів такого явища.
6. Чому краплі води злітають з мокрої парасольки внаслідок різкого струшування?
7. Чому не можна різко гальмувати, коли швидко їдеш на велосипеді?
8. На нитці підвішено важку кулю, а знизу до неї прикріплено таку саму нитку. Яка з ниток порветься, якщо різко смикнути за нижню нитку? Якщо плавно потягти за ту саму нитку? Поясніть вашу відповідь.
9. Закріплена на візку гармата стріляє в горизонтальному напрямі. Швидкість ядра $300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Якою буде швидкість візка після пострілу, якщо маса візка з гарматою дорівнює 500 кг, а маса ядра дорівнює 5 кг?

1. Взаємодії та сили
2. Сили пружності
3. Закон Гука
4. Додавання сил

1. ВЗАЄМОДІЇ ТА СИЛИ

Взаємодію тіл описують за допомогою **сил**, що діють між тілами. Наприклад, коли м'яч лежить на долоні, з боку м'яча на долоню діє сила, напрямлена вниз, а на м'яч з боку долоні — сила, напрямлена вгору (рис. 8.1).

Кожну силу характеризують:

1) **числовим значенням**: футбольний м'яч тисне на долоню сильніше, ніж тенісний;

2) **напрямом**: м'яч тисне на долоню зверху вниз, а долоня на м'яч — знизу вгору.

Нагадаємо, що величини, що їх характеризують числовим значенням (модулем) і напрямом, називають **векторними**. Отже,

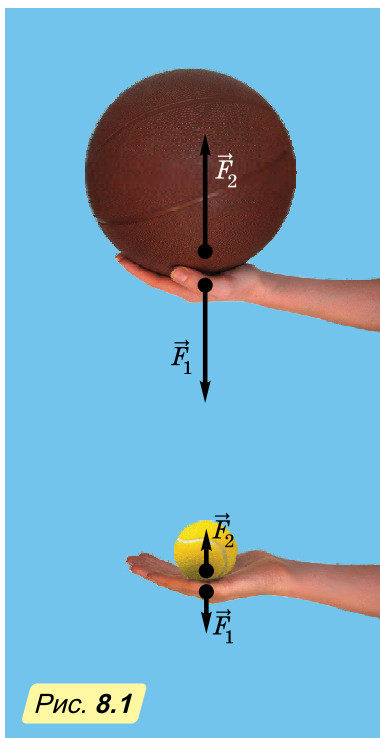


Рис. 8.1

сила — векторна величина, яка є мірою взаємодії тіл.

У механіці вивчають взаємодії, зумовлені силами **пружності**, **тяжіння й тертя**. Докладніше про кожен з цих сил ми розповімо далі.

На рисунках сили, так само як і інші векторні величини, позначають стрілками. Початок стрілки збігається з точкою

прикладання сили, напрям стрілки вказує напрям сили, а довжина стрілки пропорційна модулю сили. Наприклад, на рис. 8.1 зображено силу \vec{F}_1 , з якою м'яч тисне на долоню, та силу \vec{F}_2 , з якою долоня тисне на м'яч.

Ви, мабуть, помітили, що ці сили на рисунках зображено **протилежними за напрямом і однаковими за модулем**. Це не випадково: як установив Ісак Ньютон, тіла завжди взаємодіють із силами, які однакові за модулем і протилежні за напрямом.

ПРИКЛАДИ ДІЙ СИЛ

Розгляньмо книжку, що лежить на столі. На неї діють дві сили: з боку Землі — сила притягання \vec{F}_t , напрямлена вниз (сила тяжіння), і з боку стола — сила пружності напрямлена вгору. Книжка перебуває в спокої тому, що ці сили врівноважують одна одну.

Зверніть увагу: сила пружності напрямлена **перпендикулярно до поверхні стола**. Тому її називають зазвичай **силою нормальної реакції**, бо перпендикуляр називають також **нормаллю**.

Якщо книжка лежить на похилій площині, на книжку діють три сили: сила тяжіння, сила нормальної реакції та сила тертя, напрямлена уздовж площини вгору (рис. 8.3).

Оскільки книжка перебуває в спокої, ці три сили врівноважують одна одну.

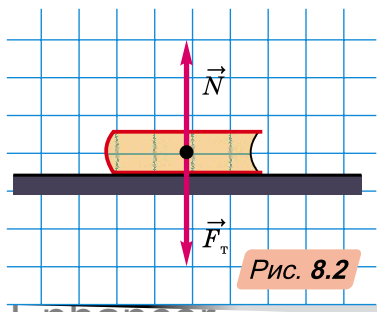


Рис. 8.2

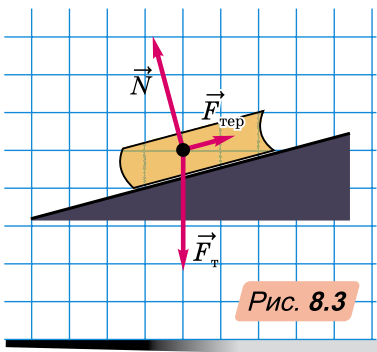


Рис. 8.3

ОДИНИЦЯ СИЛИ

Як одиницю сили в SI вибрано силу, під дією якої на тіло масою 1 кг у напрямі руху тіла швидкість

тіла щосекунди збільшується на $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. На честь Ісака Ньютона одиницю сили названо¹ **ньютон** (Н). Це порівняно невелика сила. Наприклад, тримаючи на руці літровий пакет молока або соку, ви прикладаєте до нього силу, що дорівнює приблизно десяти ньютонам.

Кожен з вас може прикладати силу в кілька сотень ньютонів.

2. СИЛИ ПРУЖНОСТІ

Докладніше знайомитися із силами ми почнемо із сил пружності.



Силу пружності зумовлено деформацією тіла, тобто зміною його форми.

Саме ці сили, що діють між м'ячем і долонею, зображено на рис. 8.1.

Що ж спричинює сили пружності?

Як ви вже знаєте з курсу фізики 7-го класу, молекули, з яких складаються тіла, взаємодіють між собою, причому на малих відстанях молекули **відштовхуються**, а на великих — **притягуються** (ідеться про відстані, порівнянні з розмірами самих молекул). У нездеформованому тілі молекули розташовані саме на таких відстанях від своїх «сусідів», що сили притягання та відштовхування врівноважені.

Коли ми розтягуємо тіло, відстані між молекулами трохи збільшуються, тому починають переважати сили притягання. Завдяки цьому з боку деформованого тіла виникає сила пружності, напрямлена так, щоб **зменшити деформацію тіла**. А під час стискання тіла відстані між молекулами зменшуються, унаслідок чого починають переважати сили відштовхування. Отже, і в цьому разі сила пружності, що діє з боку здеформованого тіла, напрямлена так, щоб **зменшити деформацію тіла**.

¹ Позначення одиниць, названих на честь учених, пишуть з великої літери, а назви цих одиниць — з малої.

3. ЗАКОН ГУКА

Проведемо дослід



Знайдемо на досліді співвідношення між деформацією та силою пружності.

Візьмемо пружину і набір **однакових** тягарців (однакового об'єму та виготовлених з того самого металу).

Підвісимо до пружини спочатку один тягарець і виміряємо видовження пружини x (рис. 8.4).

Додамо потім ще один тягарець — тоді сила пружності **збільшиться вдвічі**: адже тепер вона врівноважує силу тяжіння, що діє на **два** тягарці.

І ми побачимо, що видовження пружини теж стало **вдвічі більшим**.

Цей дослід наводить на думку, що

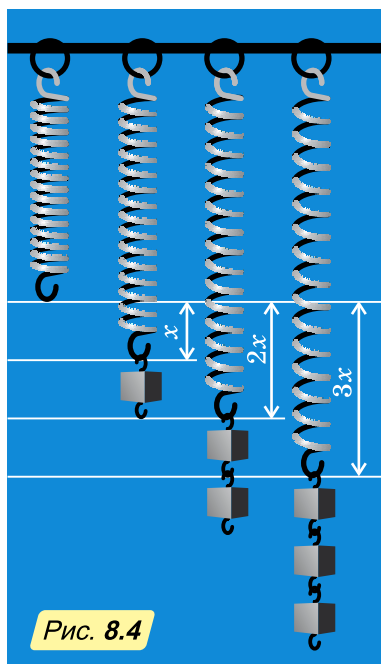


Рис. 8.4

модуль сили пружності $F_{\text{пр}}$ прямо пропорційний видовженню пружини x .



Підвішуючи до пружини ще тягарці, ми переконаємося, що дослід підтверджує наше припущення (рис. 8.4). Співвідношення між силою пружності та видовженням пружини вперше було встановлено на досліді англійським фізиком Робертом Гуком. Тому його називають **законом Гука**.

Закон Гука можна записати так:

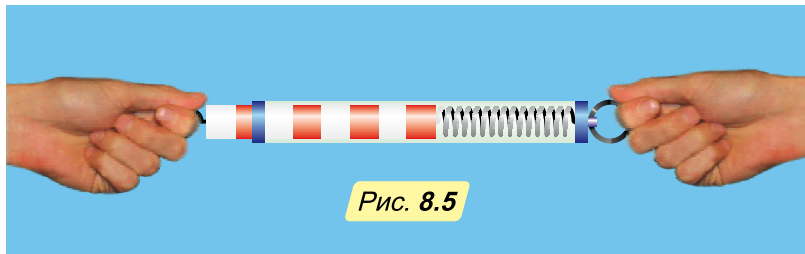
$$F_{\text{пр}} = kx.$$

Коефіцієнт пропорційності k називають **жорсткістю** пружини. Як видно з наведеної формули, одиницею

жорсткості є $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

ВИМІРЮВАННЯ СИЛ ЗА ДОПОМОГОЮ СИЛИ ПРУЖНОСТІ

Отже, деформація тіла може бути мірою сили пружності. Тому силу пружності часто використовують для **вимірювання** сил. Прилад для вимірювання сили називають **динамометром** (рис. 8.5).



Для градуювання динамометра, тобто побудови його шкали, зазвичай використовують закон Гука (див. лабораторну роботу № 5).

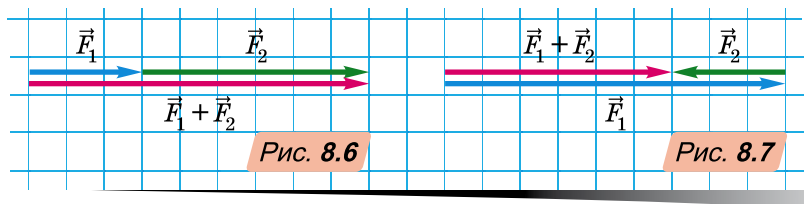
4. ДОДАВАННЯ СИЛ

Досліди свідчать, що в тих випадках, коли розмірами тіла можна знехтувати, дію на тіло кількох сил можна замінити дією **однієї** сили, яку називають **рівнодійною** цих сил.

Знаходження рівнодійної кількох сил називають **додаванням** цих сил. Оскільки сили є векторними величинами, то їх додають за правилами додавання векторів. У цьому навчальному році ми обмежимося додаванням сил, **які діють уздовж однієї прямої**. У такому разі додавання сил нагадує вже знайоме вам додавання чисел, які мають однакові або протилежні знаки.

1. Якщо дві сили напрямлені **однаково**, їх рівнодійна напрямлена так само, а модуль рівнодійної дорівнює сумі модулів сил-доданків. На рис. 8.6 наведено приклад додавання таких сил. Сили-доданки позначено синьою та зеленою стрілками, а їх рівнодійну — червоною стрілкою.

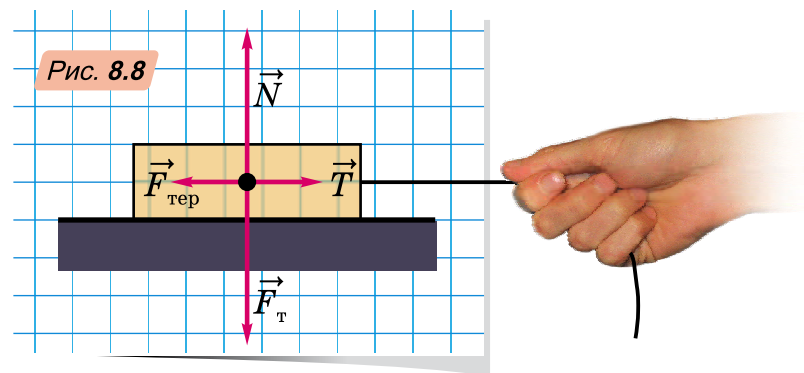
2. Якщо дві не однакові за модулем сили напрямлені протилежно, їх рівнодійна напрямлена як більша з цих сил, а модуль рівнодійної дорівнює різниці модулів сил-доданків. На рис. 8.7 наведено приклад додавання таких сил.



КОЛИ СИЛИ ВРІВНОВАЖУЮТЬ ОДНА ОДНУ?

Якщо дві однакові за модулем сили напрямлені протилежно, їхня рівнодійна дорівнює нулю. У такому разі кажуть, що ці сили **врівноважують** (компенсують) одна одну.

Із силами, що врівноважують одна одну, ми вже зустрічалися, наприклад, коли книжка лежить на столі, сили, які діють на книжку (сила тяжіння з боку Землі та сила пружності з боку стола), урівноважують одна одну (рис. 8.3).



Урівноважити одна одну можуть також сили, що діють на **рухоме** тіло. У такому разі швидкість тіла залишається незмінною (за **модулем** і **напрямом**). Наприклад,

коли брусок тягнуть за нитку й він рухається по горизонтальній поверхні стола зі сталою швидкістю, на брусок діють чотири сили, що попарно врівноважують одна одну (рис. 8.8). Напрявлену вниз силу тяжіння \vec{F}_t урівноважує напрямлена вгору сила пружності \vec{N} , що діє з боку стола, а силу пружності \vec{T} , що діє з боку нитки, урівноважує напрямлена протилежно руху бруска сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$.

Зверніть увагу: урівноважувати одна одну можуть лише сили, що діють на **те саме тіло**! Так, у першому з наведених вище прикладів ми розглядали сили, що діють на книжку, а в другому — на брусок.

Сили ж, з якими два тіла **взаємодіють між собою**, не можуть урівноважити одна одну, хоча вони завжди напрямлені протилежно й однакові за модулем! Річ у тім, що ці сили прикладено до **різних** тіл. Тому швидкість кожного з цих тіл унаслідок взаємодії може змінюватися по-своєму.

Наприклад, ви вже знаєте, що Земля притягує камінь, що падає, з такою самою за модулем силою, що й камінь — Землю, і напрямлені ці сили притягання протилежно. Але швидкість каменя внаслідок дії сили притягання Землі щосекунди збільшується приблизно на $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а Земля практично не «відчуває» притягання з боку каменя.

Причина такої різної відмінності полягає в тому, що маса Землі в багато разів більша за масу каменя. А зміна швидкості тіла визначається не тільки силою, що діє на це тіло, а й масою тіла.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Що таке сила? Скільки сил відповідають одній взаємодії між двома тілами?
2. Як позначають сили на рисунках? Зобразіть сили, що діють на брусок, який лежить на столі.
3. Яка одиниця сили в SI?
4. Чи можете ви прикласти силу, яка дорівнює ста ньютонам?
5. Які види сил розглядають у механіці?
6. Яка причина виникнення сил пружності?

7. Яка формула виражає закон Гука? Як використовують цей закон для градування динамометрів?
8. Під дією сили 10 Н пружина видовжилася на 1 см. Чому дорівнює жорсткість пружини?
9. Градуюючи динамометр, установили, що сила 5 Н розтягує пружину динамометра на 10 см. Якою треба зробити відстань між сусідніми поділками шкали динамометра, щоб ціна поділки дорівнювала 0,1 Н?
10. Що таке сила нормальної реакції? Як вона напрямлена? Наведіть приклади напрямлених по-різному сил нормальної реакції.
11. Що таке рівнодійна? Як її знаходять, якщо сили напрямлені в один бік? У протилежні боки?
12. На тіло діють три сили, напрямлені вздовж однієї прямої. Модулі цих сил дорівнюють 1 Н, 2 Н і 3 Н. Чи можуть ці сили врівноважити одна одну? Чому може дорівнювати рівнодійна цих сил за модулем?

Apago PDF Enhancer

1. Падіння тіл
2. Сила тяжіння
3. Вага
4. Невагомість

1. ПАДІННЯ ТІЛ

Давньогрецький учений Арістотель, виходячи лише зі *спостережень*, уважав, що «важкі» тіла падають швидше, ніж «легкі».

І це дійсно здається правдоподібним: наприклад, металева куля падає значно швидше аркуша паперу (рис. 9.1). Тому таке уявлення про падіння тіл «протрималося» близько двох тисяч років, поки його не піддав сумніву Галілей, який перейшов від спостережень до *дослідів*.

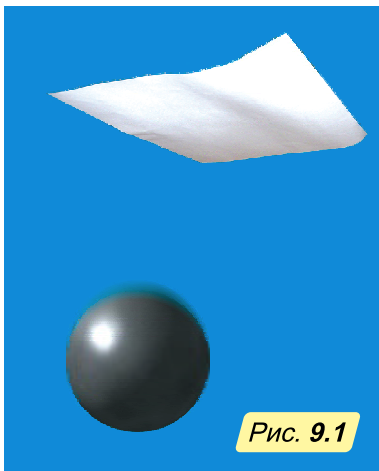


Рис. 9.1



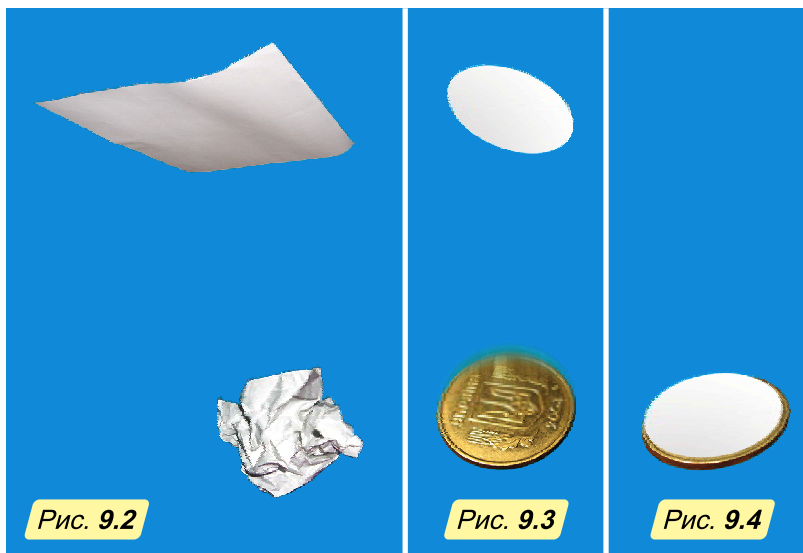
Проведемо досліді

Якщо Арістотель мав рацію, то тіла однакової маси повинні падати однаково. Перевіримо на досліді: чи дійсно це так?

Відпустимо з тієї самої висоти аркуш паперу та зроблену із такого самого аркуша паперову грудку. Аркуш падає набагато повільніше за грудку (рис. 9.2), хоча їхні *маси однакові*.

Отже, тіла, що мають однакову масу, не обов'язково падають однаково — дослід спростовує це твердження Арістотеля, а це означає, що воно *неправильне*.

Перевіримо тепер — і теж *на досліді*, — чи дійсно тіла *різної* маси обов'язково падають по-різному.



Візьмемо монету та паперовий кружок такого самого розміру та відпустимо їх одночасно. Ми побачимо, що «важка» монета падає значно швидше за «легкий» кружок (рис. 9.3). А тепер повторимо цей дослід, поклавши паперовий кружок на монету. Ми побачимо, що цього разу вони падають разом, тобто кружок і монета падають **одночасно** (рис. 9.4).

Грунтуючись на дослідах, подібних до описаних, Галілей припустив, що **відмінність у падінні тіл зумовлена тільки опором повітря**. Наприклад, під час падіння опір повітря для паперового аркуша значно більший, ніж для паперової грудки. Для монети ж і паперового кружка сила опору повітря майже однакова, але сила тяжіння для монети значно більша, ніж для кружка. А коли кружок падав безпосередньо за монетою, вона начебто «прокладала йому дорогу» крізь повітря — ось чому кружок падав разом із монетою.

Щоб перевірити своє припущення, Галілей вивчав падіння кулі та гарматного ядра з похилої Пізанської башти. І хоча маси цих тіл відрізняються в багато разів, куля та ядро впали практично **одночасно**, підтвердивши припущення Галілея (рис. 9.5).

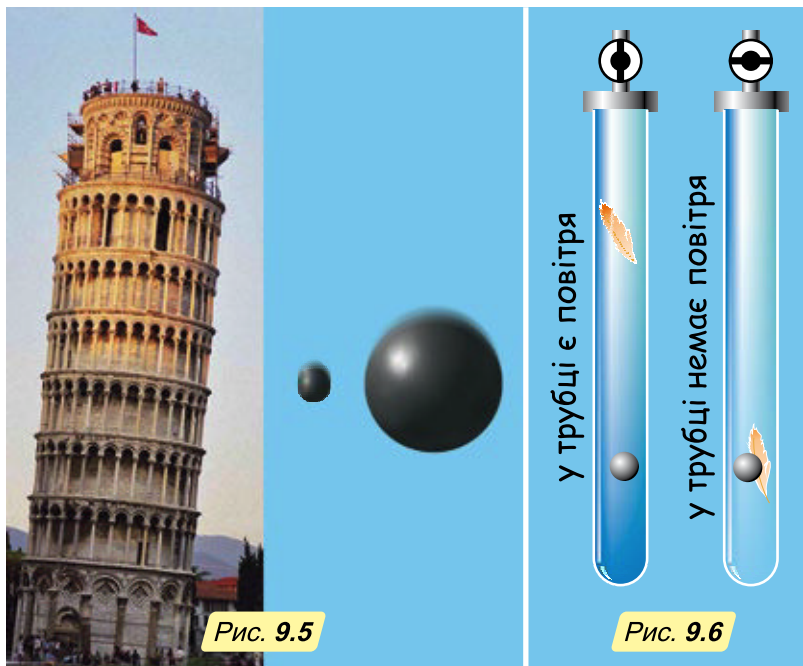


Рис. 9.5

Рис. 9.6

Arago PDF Enhancer



Проведемо дослід

Переконалися, що відмінність у падінні тіл зумовлена опором повітря, можна й не кидаючи гарматних ядер з башти. Покладемо в скляну трубку металеву кульку та пір'їнку та перевернемо трубку (рис. 9.6). Ми побачимо, що пір'їнка, падаючи, відстає від кульки.

Але якщо відпомпувати із трубки повітря, кулька й пір'їнка падатимуть однаково. Отже, відмінність у їхньому падінні була зумовлена лише тим, що для пір'їнки роль опору повітря більша.

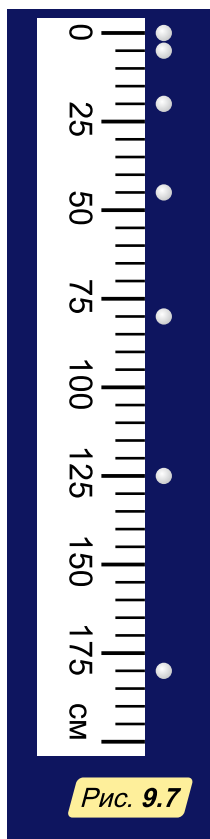
Падіння тіл за відсутності опору повітря називають **вільним падінням**. Як ми бачили,



під час вільного падіння всі тіла падають однаково.

Галілей хотів вимірити, як змінюється швидкість тіла під час вільного падіння, але вона змінюється так швидко, що вимірити її він не зміг: адже тоді найточнішими годинниками були водяні годинники.

Використовуючи ж сучасні технічні засоби, падіння можна багаторазово «сповільнити».



Це можна зробити, наприклад, сфотографувавши тіло, яке падає, якщо воно освітлене стробоскопом — приладом, який дає короткі спалахи через однакові проміжки часу. Тоді на одній фотографії видно послідовні положення тіла через однакові проміжки часу.

На рис. 9.7 наведено таку фотографію кульки, що падає зі стану спокою. Проміжок часу між послідовними спалахами стробоскопу дорівнював 0,1 с.

Ми бачимо, що коли тіло вільно падає, то за послідовні **однакові** проміжки часу воно долає **різні** шляхи. Отже, **під час падіння тіло рухається нерівномірно**.

Виміри показують, що в разі вільного падіння швидкість тіла щосекунди збільшується на $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2. СИЛА ТЯЖІННЯ

Англійський учений Ісак Ньютон зрозумів, що швидкість тіла під час падіння змінюється тому, що

на всі тіла діє сила притягання з боку Землі. Цю силу називають силою тяжіння.



Виходячи з того, що під час вільного падіння без початкової швидкості швидкість будь-якого тіла збільшується щосекунди на $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Ньютон довів, що **сила тяжіння прямо пропорційна масі тіла**, а коефіцієнтом пропорцій-

ності є величина $g = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$. Її називають **прискоренням вільного падіння**. Отже,



модуль сили тяжіння $F_t = mg$, де m — маса тіла, g — прискорення вільного падіння.

3. ВАГА

Покладіть на долоню яблуко. Ви відчуєте, що яблуко тисне на долоню з певною силою, напрямленою **вниз** (рис. 9.8). Таку саму, напрямлену вниз, силу ви відчуєте і в тому разі, якщо триматимете яблуко, підвішене на нитці (рис. 9.9). Як ми вже знаємо, цю силу зумовлює притягання яблука до Землі.

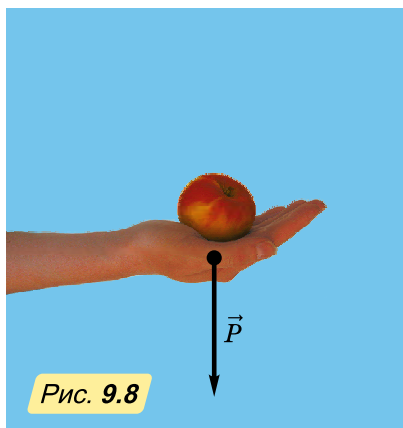


Рис. 9.8

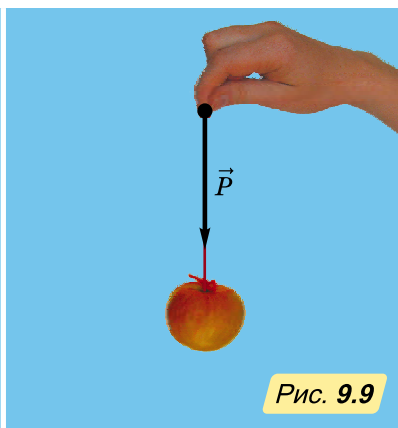


Рис. 9.9



Силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс, називають вагою тіла.

Вагу позначають зазвичай \vec{P} . Розрахунки та дослід свідчать, що



вага тіла, яке перебуває у спокої, дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.

Однак це не означає, що вага та сила тяжіння — одна й та сама сила! Ці сили суттєво відрізняються одна від одної.

По-перше, вони прикладені до *різних* тіл: сила тяжіння прикладена до тіла, а вага тіла — до опори або підвісу.

По-друге, ці сили мають *різну фізичну природу*: сила тяжіння — це вияв всесвітнього тяжіння, що діє на відстані, а вага — це зазвичай сила пружності, що діє у разі безпосереднього контакту.

І нарешті, сила тяжіння діє на тіло, що перебуває поблизу Землі, *завжди*, а вага тіла може при цьому дорівнювати нулю! Нижче ми розглянемо цей випадок окремо.

ВИМІРЮВАННЯ МАСИ ТІЛА ЗВАЖУВАННЯМ

Вам, звичайно, знайомі пружинні ваги, за допомогою яких вимірюють масу тіла *зважуванням* (рис. 9.10). На чому ж ґрунтується такий спосіб вимірювання маси?

Згідно із законом Гука деформація пружини пропорційна вазі тіла.

Вага ж тіла, що перебуває в спокої, дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.

А сила тяжіння, у свою чергу, пропорційна масі тіла.

З цього випливає, що *деформація пружини пропорційна масі підвішеного тіла*.

Пружинні ваги — це динамометр, шкалу якого спеціально розмічено (проградуйовано) так, що вона показує масу підвішеного вантажу (рис. 9.10).



Рис. 9.10

4. НЕВАГОМІСТЬ

Приберемо з-під тіла опору — воно почне падати. Чому дорівнює вага тіла під час вільного падіння?

Згадаймо, що вага тіла — це сила, з якою тіло давить на опору або розтягує підвіс. Отже, якщо тіло не має опори

або підвісу, то воно не має й ваги! А точніше, вага цього тіла дорівнює *нулю*.



Стан, за якого вага тіла дорівнює нулю, називають невагомістю.

Зверніть увагу: у стані невагомісті вага тіла дорівнює нулю, але сила тяжіння, як і раніше, дорівнює mg . А це означає, що вага тіла не завжди дорівнює силі тяжіння!

У стані невагомісті, як ми вже бачили, перебувають усі тіла, що вільно падають. А ще точніше — тіла, на які діє *тільки сила тяжіння*. Ось чому в стані невагомісті перебувають космонавти під час польоту за вимкнених двигунів: у такому разі як корабель, так і всі тіла в ньому рухаються лише під дією сили тяжіння, тобто перебувають у стані невагомісті.



Але навіть якщо ви дуже хочете відчувати стан невагомісті, можна не записуватись у космонавти. На короткий час можна стати невагомим, просто підстрибнувши (рис. 9.11)! З того моменту, коли ваші ноги відірвуться

від підлоги, і до того моменту, коли вони торкнуться підлоги знову, ви будете перебувати в стані невагомості: адже під час «польоту» ви не тиснете на опору і не розтягуєте підвіс.

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Як падатимуть різні тіла, якщо опором повітря можна знехтувати? Які досліди підтверджують вашу відповідь?
2. Чому аркуш паперу падає повільніше, ніж камінь?
3. Як змінюється швидкість тіла під час вільного падіння?
4. Чому дорівнює прискорення вільного падіння?
5. Що таке сила тяжіння? Як її можна виразити через масу тіла та прискорення вільного падіння?
6. Що таке вага тіла? Чому дорівнює вага тіла, що перебуває в спокої?
7. Чим відрізняється вага від сили тяжіння і що в них спільного?
8. Чому дорівнює ваша вага?
9. Чому масу тіла можна вимірити зважуванням?
10. Чи завжди вага тіла дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло?
11. Що таке невагомість? За якої умови тіло перебуває в стані невагомості?

§ 10

СИЛИ ТЕРТЯ

1. Сила тертя ковзання

2. Сила тертя спокою

3. Сила тертя кочення

Хочеш дізнатися більше?

Чому скриплять двері та співає скрипка?

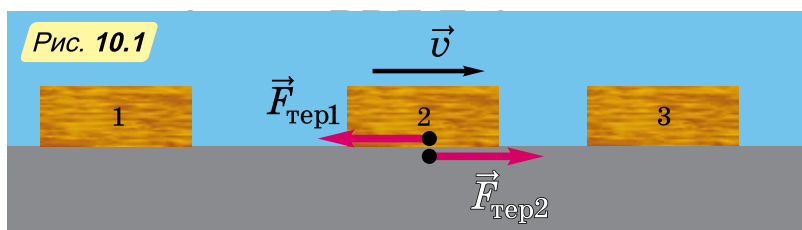
Навіщо використовують мастило?

1. СИЛА ТЕРТЯ КОВЗАННЯ



Проведемо дослід

Якщо штовхнути брусок, який лежить на столі, він набуде деякої швидкості, але під час руху бруска його швидкість буде зменшуватись: на рис. 10.1 показано три послідовні положення бруска, розділених однаковими проміжками часу.



Яка ж «невидима» сила гальмує брусок? Це — **сила тертя ковзання**. Вона діє з боку стола і напрямлена протилежно швидкості бруска.

Така сама за модулем, але протилежно напрямлена сила — теж сила тертя ковзання — діє на стіл з боку бруска (рис. 10.1). Дію цієї сили можна зробити помітною, поклавши на стіл тканину: діючи на тканину силою тертя, брусок зрушить її в напрямі руху.

Сили тертя ковзання виникають між тілами, що контактують між собою, коли вони рухаються одне відносно одного. Ці сили напрямлені завжди так, що зменшують швидкість відносного руху тіл.



З'ясуємо на досліді, від чого залежить сила тертя ковзання. Тягтимемо за допомогою динамометра брусок уздовж поверхні стола так, щоби він рухався зі сталою швидкістю. У такому разі, як ми вже знаємо, сили, які діють на брусок, урівноважують одна одну — ці сили зображено на рис. 10.2. Сила пружності з боку пружини \vec{T} урівноважує силу тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тер}}$, тому за показами динамометра можна визначити модуль сили тертя.

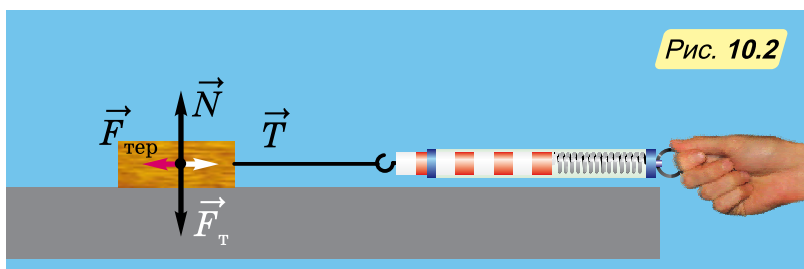


Рис. 10.2

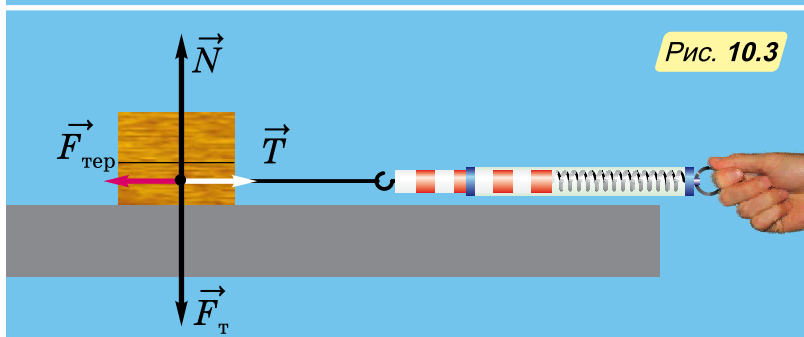


Рис. 10.3

Повторимо цей дослід, поклавши на брусок такий самий: тоді сила тяжіння, а отже, і сила нормального тиску збільшиться **удвічі**. Ми побачимо, що сила тертя ковзання збільшилася також **удвічі** (рис. 10.3). Це наводить на думку, що модуль сили тертя ковзання $F_{\text{тер}}$ пропорційний модулю сили нормального тиску N . Досліди з кількома брусками підтверджують це припущення. Отже,

$$\text{сила тертя ковзання } F_{\text{тер}} = \mu N.$$



Коефіцієнт пропорційності μ називають **коефіцієнтом тертя**. Його визначають за допомогою досліду (див. лабораторну роботу № 8).

Нижче наведено 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 льоду	0,15 – 0,20

Зверніть увагу на те, як зменшується коефіцієнт тертя шин по мокрому асфальту, а особливо по льоду порівняно із сухим асфальтом. Отож будьте особливо обережні на дорозі під час дощу або ожеледиці!

? Брусок масою 1 кг тягнуть по горизонтальній поверхні стола, прикладаючи горизонтальну силу 4 Н. При цьому брусок рухається зі сталою швидкістю. Чому дорівнює коефіцієнт тертя між бруском і столом?

Позначимо масу бруска m , а силу, з якою тягнуть брусок, \vec{F} .

Із формули $F_{\text{тер}} = \mu N$ випливає, що $\mu = \frac{F_{\text{тер}}}{N}$. Оскільки брусок рухається зі сталою швидкістю, сила тертя врівноважує силу, з якою тягнуть брусок, тобто дорівнює їй за модулем: $F_{\text{тер}} = F$. Для бруска на горизонтальній поверхні стола сила нормальної реакції врівноважує силу тяжіння і тому дорівнює їй за модулем:

$N = mg$. Отже, $\mu = \frac{F}{mg}$. Перевіливши одиниці величин, підставляємо числові дані й маємо: $\mu = \frac{4}{1 \cdot 9,8} \approx 0,4$.

ЧЕРЕЗ ЩО ВИНИКАЄ СИЛА ТЕРТЯ КОВЗАННЯ?

На поверхнях твердих тіл завжди є невеликі нерівності: виступи та впадини, добре помітні, коли їх розглядають за допомогою лупи чи мікроскопа.

Коли тіла, що контактують, рухаються одне відносно одного, ці нерівності чіпляються одна за одну, унаслідок чого й виникає сила тертя ковзання. Схематично це зображено на рис. 10.4.

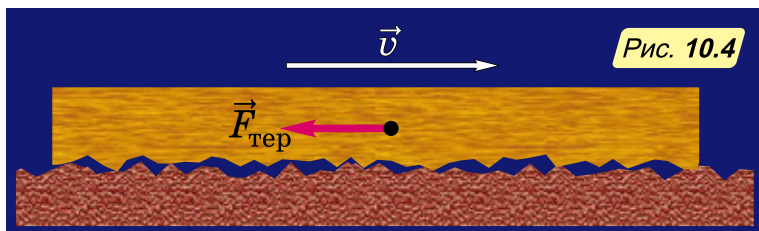


Рис. 10.4

Силу тертя ковзання можна значно зменшити, згладжуючи поверхні. Однак тут треба не перестаратися: якщо поверхні стануть надто гладенькими, сила тертя ковзання може збільшитися! Чому?

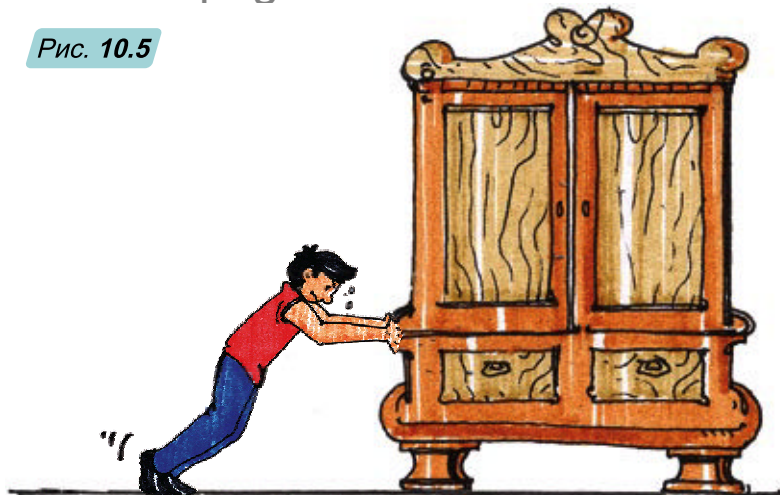
Річ у тім, що для дуже гладеньких поверхонь починають виявлятися сили міжмолекулярного притягання між молекулами цих поверхонь.

2. СИЛА ТЕРТЯ СПОКОЮ

Кожен знає, як трудно зрушити з місця важку шафу (рис. 10.5). Яка ж сила врівноважує силу, прикладену до шафи?

Араго PDF Enhancer

Рис. 10.5



Це — *сила тертя спокою*. Вона виникає, коли намагаються зсунути одне з тіл, що контактують, відносно другого, і перешкоджає рухові тіл одне відносно одного.

Якщо збільшувати прикладену до шафи силу, ми все-таки зсунемо шафу. Отже, сила тертя спокою не може перевищувати деяку «граничну» величину, яку називають **максимальною силою тертя спокою**. Дослід свідчить, що максимальна сила тертя спокою трохи більша за силу тертя ковзання, однак у багатьох задачах для спрощення ці сили вважають однаковими.

Причини виникнення сили тертя спокою подібні до причин виникнення сили тертя ковзання: зачеплення нерівностей шорстких поверхонь тіл і подолання сил міжмолекулярного притягання.

Незважаючи на свою назву, сила тертя **спокою** часто спричинює **рух** тіл!

Наприклад, без цієї сили ми в буквальному розумінні слова і кроку не могли б ступити: адже роблячи крок, ми **відштовхуємося** від дороги саме за допомогою сили тертя спокою. Сила тертя спокою розганяє й автомобілі: завдяки їй колеса, обертаючись, відштовхуються від дороги. Ось чому на льоду, де тертя мале, колеса буксують.

3. СИЛА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Коли кругле тіло (куля, циліндр, диск) котиться по поверхні, на нього з боку поверхні діє **сила тертя кочення**, напрямлена протилежно швидкості тіла.

Зазвичай **сила тертя кочення набагато менша від сили тертя ковзання**: кожен знає, що тягти вантаж «волоком» (рис. 10.6) набагато тяжче, ніж котити візок із тим самим вантажем (рис. 10.7).

Тому в механізмах намагаються, де це можливо, замінити тертя ковзання тертям кочення — використовуючи, наприклад, підшипники.

Коли сталеві колеса рухаються по сталевих рейках, сила тертя кочення в сотні разів менша за силу тертя ковзання (і відповідно за максимальну силу тертя спокою). Тому один локомотив, «відштовхуючись» колесами від рейок за допомогою сили тертя **спокою**, везе по тих самих рейках більше півсотні навантажених товарних вагонів, колеса яких **котяться**.

Зазвичай тертя кочення то менше, що **твердіші** поверхні тіл, які контактують між собою: тому, наприклад, ста-

лева кулька довго котитиметься по склу. Ось чому рейки та колеса вагонів виготовляють зі сталі, а шосе роблять із твердим покриттям.

Рис. 10.6

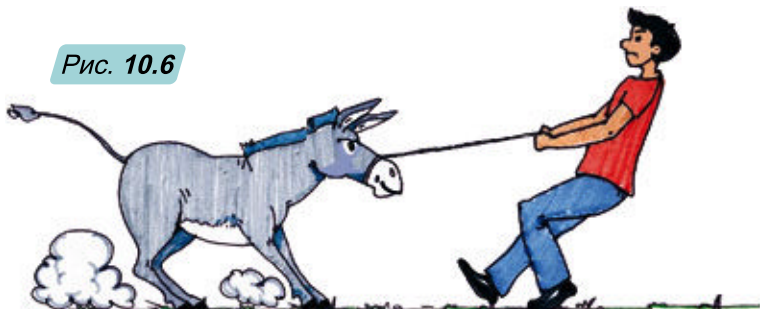
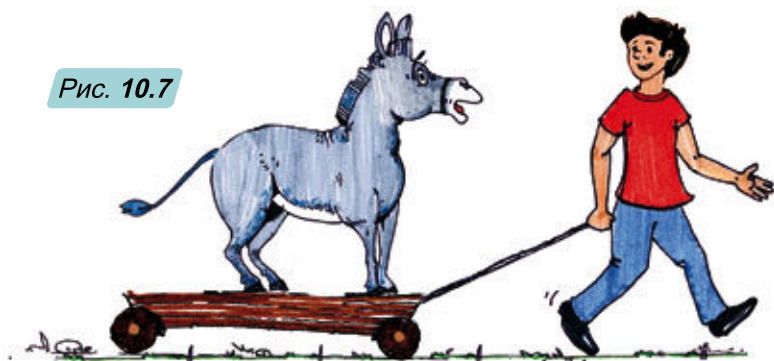


Рис. 10.7



Хочеш дізнатися більше?



ЧОМУ СКРИПЛЯТЬ ДВЕРІ ТА СПІВАЄ СКРИПКА?

Максимальна сила тертя спокою зазвичай трохи перевищує силу тертя ковзання, унаслідок чого тіло зрушує з місця не плавно, а ривком.

Саме ці дрібні ривки, що відбуваються з частотою в десятки й сотні герц, і спричиняють скрипіння в незмащених завісах дверей. Позбутися такого скрипіння дуже просто: досить змастити завіси.

Але те, що дратує у дверях, зачаровує у **скрипці**, сама назва якої розкриває «секрет» її звучання. Коли смичком

проводять по струнах, через дію сили тертя спокою струни спочатку рухаються за смичком, але потім «зриваються», після чого починають коливатися — кожна зі своєю певною частотою, яка й визначає висоту звука цієї струни.

НАВІЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ МАСТИЛО?

Сила опору під час руху в рідині чи газі зазвичай набагато менша за силу тертя ковзання між сухими поверхнями. Тому для зменшення сили тертя використовують **мастило**: воно заповнює простір між поверхнями, і тому їхні нерівності перестають чіплятися одна за одну. Крім того, мастило зменшує й дію міжмолекулярних сил.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Коли виникає сила тертя ковзання? Як вона напрямлена?
2. Як і від чого залежить сила тертя ковзання?
3. Коефіцієнтом пропорційності між якими величинами є коефіцієнт тертя?
4. Через що виникає сила тертя ковзання?
5. Як можна зменшити силу тертя ковзання?
6. Коли виникає сила тертя спокою? Як вона напрямлена?
7. Яка головна особливість сили тертя кочення? Де і як використовують цю особливість?
8. Якщо покласти на стіл брусок, він перебуватиме в спокої, а куля починає котитися. Чи діє на брусок, що лежить на столі, сила тертя?
9. Які сили діють на брусок, що перебуває в спокої на похилій площині? Зобразіть ці сили на рисунку.
10. Які ви знаєте способи збільшення та зменшення сили тертя? Наведіть приклади використання цих способів.
11. Брусок масою 1 кг рухається рівномірно по горизонтальній поверхні стола під дією горизонтально прикладеної сили, що дорівнює 3 Н. Чому дорівнює коефіцієнт тертя між столом і бруском?

1. Важіль
2. Момент сили. Правило моментів
3. Блоки
4. Похила площина

1. ВАЖІЛЬ

Ви вже знаєте, що тіло може перебувати в спокої (або, як часто кажуть, *у рівновазі*) тільки за умови, що сили, які діють на тіло, *урівноважують* одна одну. Наприклад, книжка перебуває у спокої на столі (тобто перебуває в рівновазі) тому, що силу тяжіння, яка діє на книжку, урівноважує сила нормальної реакції з боку стола.

Розгляньмо тепер рівновагу тіла, яке може обертатися навколо нерухомої точки. Таке тіло називають *важелем*, а нерухому точку — *точкою опори*.

Добре знайомий вам із дитинства приклад важеля — гойдалка. Як ви знаєте, на ній можуть урівноважувати одне одного як люди однакової маси (рис. 11.1), так і люди, маси яких значно відрізняються, наприклад дитина й дорослий. Для цього дорослий мусить сісти ближче до точки опори гойдалки (рис. 11.2).

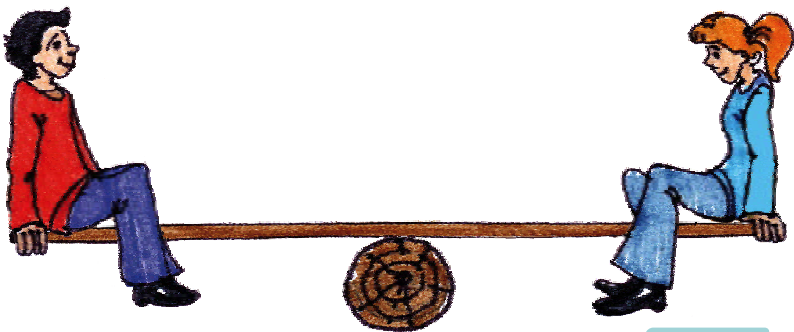


Рис. 11.1

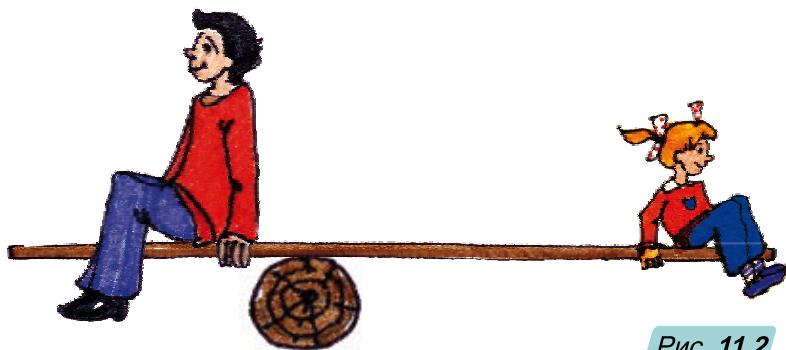


Рис. 11.2



Проведемо дослід

Знайдемо на досліді умову рівноваги важеля. Візьмемо за важіль міцний стрижень з поділками, нанесеними на однакових відстанях одна від одної, і закріпимо його так, щоб він міг вільно обертатися навколо осі, що проходить через його середину.

Будемо підвішувати до важеля різні тягарці, розташовуючи їх так, щоб важіль з тягарцями перебував у рівновазі (рис. 11.3). З боку тягарців на важіль діятимуть сили \vec{F}_1 та \vec{F}_2 , що дорівнюють вагам цих тягарців, які пропорційні їхнім масам. Відстань¹ від точки опори важеля до лінії дії сили називають **плечем** цієї сили. Позначимо l_1 та l_2 плечі сил \vec{F}_1 та \vec{F}_2 відповідно.

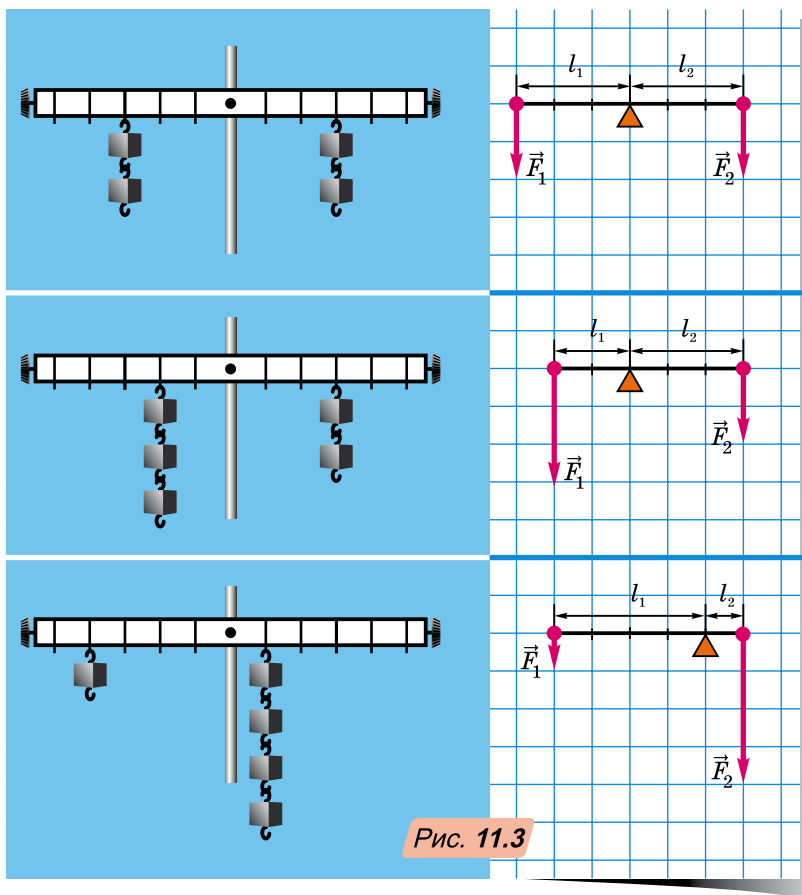
Провівши кілька дослідів, ми виявимо, що **важіль перебуває в рівновазі під дією двох сил, якщо:**



- 1) прикладені до важеля сили намагаються обертати його в протилежних напрямках;
- 2) модулі прикладених до важеля сил обернено пропорційні плечам цих сил: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$.

Це і є **умови рівноваги важеля**. Їх було встановлено на досліді давньогрецьким ученим і винахідником Архімедом у 3-му столітті до н. е.

¹ Нагадаємо, що відстанню від точки до прямої називають довжину перпендикуляра, проведеного з цієї точки до прямої.



З умови рівноваги важеля випливає, що, використовуючи важіль, можна дістати **виграш у силі**. Силою, прикладеною до більшого плеча важеля, можна врівноважити силу, яка значно більша за прикладену. Це використовували ще давні єгиптяни, піднімаючи за допомогою важелів величезні кам'яні блоки під час будівництва колосальних пірамід. Сьогодні важелі використовують у багатьох механізмах і машинах.

? Який виграш у силі можна дістати, використовуючи важіль способами, показаними на рис. 11.4 і 11.5? Необхідне вимірювання зробимо, користуючись рисунками.



Рис. 11.4



Рис. 11.5

У першому випадку точкою опори є точка дотику дошки із землею, а в другому — точка дотику дошки з колодою. У першому випадку відношення плечей важеля дорівнює 3, а в другому воно дорівнює 4. Отже, юнак дістає виграш у силі в 3 рази, а дівчина — у 4 рази.

Зверніть увагу: якщо ми за допомогою важеля дістаємо виграш у силі, то обов'язково програємо у переміщенні. Так, прикладаючи силу до довшого плеча важеля (рис. 11.5), дівчина опускає його на відстань, яка в 4 рази більша за висоту підняття юнака, тобто вона **програє у переміщенні саме у стільки разів, у скільки разів виграє у силі!**

За допомогою важеля можна дістати виграш не тільки в силі, але й у переміщенні — прикладаючи силу до **коротшого** плеча важеля. Щоправда, виграш у переміщенні неодмінно супроводжується програшем у силі.

Саме цей спосіб використання важеля природа «здогадалася» використовувати задовго до появи людини!

Кінцівки тварин являють собою систему важелів, де м'язи прикріплені до *коротших* їхніх плечей. Це дає значний *виграш у переміщенні*, що дозволяє тваринам швидко бігати.

Така особливість будови організму означає, що наші м'язи насправді набагато «сильніші», ніж ми гадаємо. Наприклад, коли людина тримає вантаж зігнутою рукою, сила, прикладена з боку м'яза, приблизно у 8 разів більша за вагу вантажу!

Умови рівноваги важеля дозволяють розраховувати розподіл навантаження на опори. Розгляньмо таку задачу.



Юнак і дівчина несуть цебро масою 12 кг на легкій і міцній палиці, як показано на рис. 11.6. З якою силою тисне палиця на плече кожного з них? Необхідне вимірювання зробімо, користуючись рисунками.

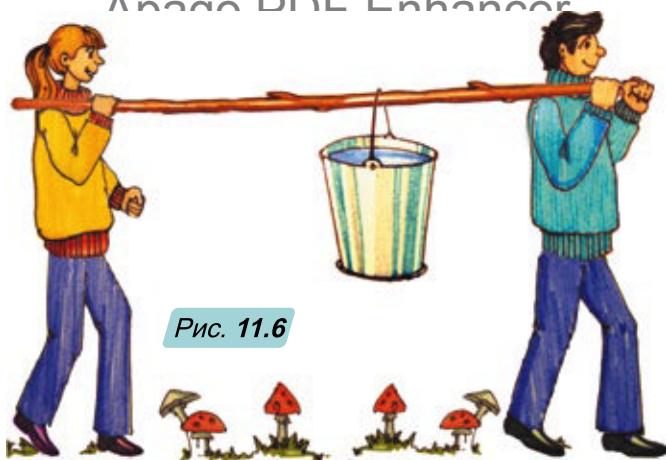


Рис. 11.6

Можна вважати палку важелем, що перебуває в рівновазі. На нього діють вага вантажу \vec{P} , яка дорівнює за модулем 120 Н, і сили пружності \vec{F}_1 та \vec{F}_2 , прикладені з боку плечей юнака й дівчини. Рівнодійна всіх сил, прикладених до важеля, дорівнює нулю, тому

$P = F_1 + F_2$. Уважатимемо за точку опори точку, у якій прикладено вагу вантажу. Сили \vec{F}_1 та \vec{F}_2 обертають важіль у протилежних напрямках, тому $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$. Вимірюючи на рисунку відношення плечей сил \vec{F}_1 та \vec{F}_2 , маємо: $\frac{l_2}{l_1} = 2$, звідки $\frac{F_1}{F_2} = 2$. Із системи рівнянь $P = F_1 + F_2$ і $\frac{F_1}{F_2} = 2$ маємо: $F_1 = \frac{2P}{3}$, $F_2 = \frac{P}{3}$, тобто на плече юнака припадає вдвічі більший вантаж, ніж на плече дівчини. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо: $F_1 = \frac{2 \cdot 120}{3} = 80$ (Н), $F_2 = \frac{120}{3} = 40$ (Н).

2. МОМЕНТ СИЛИ. ПРАВИЛО МОМЕНТІВ

Перетворимо вираз $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$ так, щоб у кожній частині рівності були величини, які характеризують лише *одну* силу: її модуль і плече. Ми дістанемо $F_1 l_1 = F_2 l_2$. Добуток модуля сили на її плече називають **моментом сили** й позначають M :

$$M = Fl.$$

Як впливає з визначення, одиницею моменту сили є $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Умова рівноваги важеля є окремим випадком **правила моментів**:



тіло, що має вісь обертання, перебуває в рівновазі, якщо сума моментів сил, які обертають тіло в одному напрямі, дорівнює сумі моментів сил, які обертають тіло в протилежному напрямі.

3. БЛОКИ

НЕРУХОМИЙ БЛОК

На рис. 11.7 показано, як можна **піднімати** вантаж, прикладаючи силу, напрямлену **вниз**. Для цього використовують **нерухомий блок** — колесо з жолобом для тро-

са, яке обертається на нерухомій осі. Прикладена сила дорівнює силі натягу тросу з одного боку блока, а вага вантажу дорівнює силі натягу тросу з другого боку блока. Надалі ми вважатимемо, що тертям у блоці можна знехтувати. У такому разі сили натягу тросу з обох боків блока однакові. Звідси випливає, що

нерухомий блок не дає виграшу в силі, а дозволяє лише змінювати напрям сили.



Рис. 11.7



Рис. 11.8

РУХОМИЙ БЛОК

Щоб дістати виграш у силі, треба використовувати **рухомий** блок. На рис. 11.8 показано, як піднімають вантаж за допомогою рухомого блока: при цьому блок піднімається разом з вантажем.

Який виграш у силі дає рухомий блок?

Щоб відповісти на це запитання, розгляньмо сили, що діють на блок. До нього прикладено три сили: вага вантажу \vec{P} , напрямлена вниз, і дві сили \vec{F} натягу троса, напрямлені вгору (рис. 11.9). Якщо масою блока та тертям у ньому можна знехтувати, рівнодійна всіх сил, прикладених до блока, дорівнює нулю.

Звідси випливає, що $P = 2F$.

Отже, $F = \frac{P}{2}$, тобто

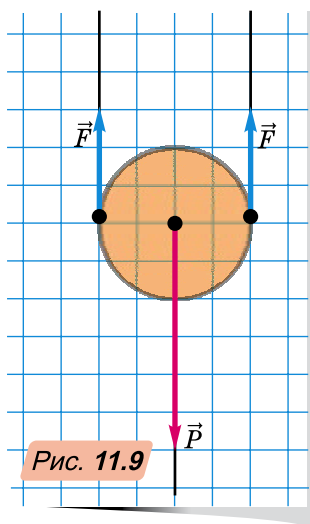


Рис. 11.9

рухомий блок дає виграш у силі у 2 рази.

Але зверніть увагу — використовуючи рухомий блок, ми програємо в переміщенні теж **удвічі**: адже для підняття вантажу на висоту h нам доведеться вибрати трос довжиною $2h$.

Отже, і цього разу, **дістаючи виграш у силі, ми в стільки ж разів програємо в переміщенні!**

Важіль і блок є прикладами **простих механізмів**. Так називають пристрої, за допомогою яких **перетворюють сили**: збільшують, зменшують або змінюють напрям.

4. ПОХИЛА ПЛОЩИНА

До простих механізмів належить також **похила площина**. Розгляньмо її властивості.

Кожен знає, що підніматися пологим підйомом набагато легше, ніж крутим, але дорога при цьому стає довшою. Як пов'язані виграш у силі з програшем у переміщенні?



Виміряємо вагу P візка (рис. 11.10), а потім будемо піднімати його вздовж похилої площини, вимірюючи динамометром силу, що прикладена до візка (рис. 11.11).

Ми побачимо, що візок можна підняти силою, яка **менша** за вагу візка \bar{P} . Виміри показують, що у випадку, коли тертям можна знехтувати, $\frac{F}{P} = \frac{h}{l}$, де h — висота похилої площини, l — її довжина (рис. 11.11). Отже,

використовуючи похилу площину, ми виграємо в силі в стільки разів, у скільки разів довжина похилої площини більша за її висоту.



І саме у стільки ж разів ми програємо в переміщенні: адже під час вертикального підняття вантажу переміщення дорівнює h , а під час руху вздовж похилої площини переміщення дорівнює l .

Завдяки тому, що похила площина дозволяє дістати виграш у силі, причому значний, якщо її довжина набагато більша за її висоту, похилу площину використовували ще в давнині для підняття вантажів — наприклад, під час будівництва єгипетських пірамід. Використовують похилу площину й сьогодні.



Рис. 11.10

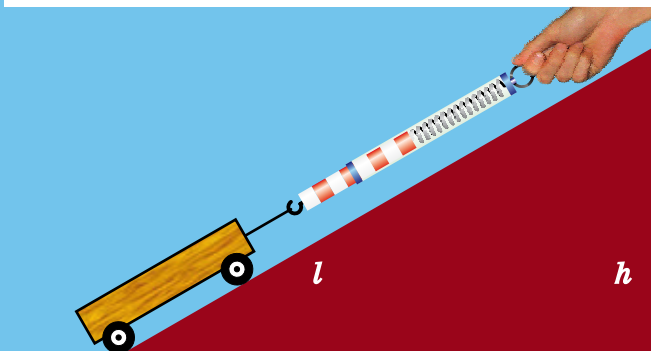


Рис. 11.11



Хочеш дізнатися більше?

ЧИ МОЖНА ЗА ДОПОМОГОЮ НЕРУХОМОГО БЛОКА ДІСТАТИ ВИГРАШ У СИЛІ?

Як ви вже знаєте, нерухомий блок не дає виграшу в силі. Але якщо піднімати самого себе, як показано на рис. 11.12, можна дістати виграш у силі вдвічі.

Під час такого підйому вага людини розподіляється порівну на дві мотузки, тому, прикладаючи силу до однієї з них, людина піднімає себе силою, яка є вдвічі меншою за вагу цієї людини. Саме так іноді піднімають самих себе альпіністи або малярі. Але й тут виграшу в силі досягають ціною програшу в переміщенні: для підняття на висоту h доведеться вибрати мотузку завдовжки $2h$.



Рис. 11.12

Apago PDF Er



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Сформулюйте умову рівноваги важеля. Наведіть приклади використання цієї умови.
2. Як за допомогою важеля дістати виграш у силі? Наведіть приклади такого використання важеля.
3. Чи можна за допомогою важеля дістати виграш у переміщенні?
4. Зобразіть у зошиті схематично ножиці, щипці, тачку та позначте на рисунках точки опори та плечі сил у кожному випадку.
5. Що таке момент сили? Сформулюйте правило моментів.
6. Що являє собою нерухомий блок? Як його використовують?
7. Що являє собою рухомий блок? Як його використовують?
8. Чи дістаємо ми виграш у силі або в переміщенні, використовуючи похилу площину? Чому дорівнює цей виграш?

1. Тиск, здійснюваний твердими тілами
2. Одиниці тиску
3. Тиск рідин
4. Сполучені посудини

Хочеш дізнатися більше?

Яким є тиск на океанських глибинах?

1. ТИСК, ЗДІЙСНЮВАНИЙ ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ

Проведемо дослід



Натисніть пальцем на дерев'яну дошку — ви не зробите в дошці навіть малої вм'ятини (рис. 12.1). Але якщо ви з такою самою силою натиснете на канцелярську кнопку, вона увійде в ту саму дошку (рис. 12.2). Чому? Адже **сила тиску**, тобто сила, **напрявлена перпендикулярно до поверхні**, на яку вона діє, в обох випадках однакова.

Річ у тім, що, коли ви тиснете на кнопку, сила, яку ви прикладаєте, діє на дуже малу **площу** — адже площа вістря кнопки в багато разів менша за площу дотику пальця з дошкою! Це висловлюють, кажучи, що вістря кнопки здійснює більший **тиск**, ніж палець, хоча **сила тиску** в обох випадках однакова.

Тиском p називають відношення сили тиску F , що діє на деяку площу S поверхні, до цієї площі:

$$p = \frac{F}{S}.$$



Тиск є **скалярною** величиною, тобто його характеризують тільки числовим значенням. Сила ж тиску, як і будь-яка сила, є величиною векторною!

Із визначення тиску випливає, що змінити тиск можна двома способами: змінивши **силу тиску** або змінивши **площу**, на яку діє ця сила.



Як змінюються сила тиску та тиск людини на сніг, коли вона стає на лижі?

Сила тиску збільшиться незначно — тільки на вагу лиж, зате **тиск зменшиться**, і дуже істотно — у стільки разів, у скільки площа лиж більша за площу підошов (тобто приблизно в 7–10 разів). Саме заради зменшення тиску й використовують лижі — у них можна ходити по пухкому снігу, не провалюючись (рис. 12.3).



Рис. 12.1

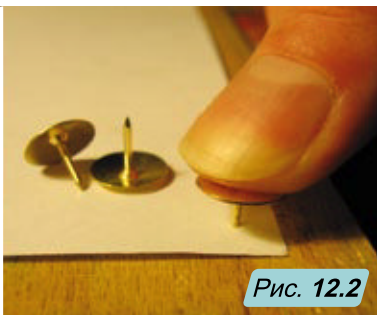


Рис. 12.2



Рис. 12.3

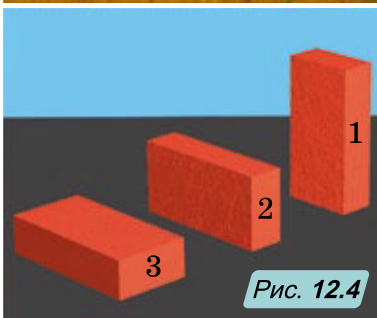


Рис. 12.4

На стіл помістили три однакові цеглини (див. рис. 12.4). За якого положення цеглини на столі (1, 2 або 3) цеглина здійснює найбільший тиск на стіл? Найменший? Яким є відношення найбільшого та найменшого тисків? Будемо вважати, що ширина цеглини вдвічі менша за її довжину та вдвічі більша за її товщину.

За будь-якого положення цеглини сила її тиску на стіл однакова — вона дорівнює вазі цеглини. Тому найбільший тиск на стіл цеглина здійснює за **найменшою** площею опори, що відповідає положенню 1. Найменший же тиск буде за **найбільшою** площею опори, що відповідає положенню 3. Площа опори у положенні 3 в 4 рази більша за площу опори в положенні 1, тому відношення найбільшого та найменшого тисків дорівнює 4.

2. ОДИНИЦІ ТИСКУ

Із визначення тиску випливає, що одиницею тиску є тиск, за якого на площу, що дорівнює 1 м^2 , діє сила тиску, що дорівнює 1 Н . Цю одиницю тиску назвали паскалем (Па) — на честь французького вченого Блеза Паскаля, який відкрив основний закон тиску рідин і газів. Отже, $1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Чи великий це тиск?



Оцінімо, який тиск здійснює на стіл один аркуш паперу, що лежить на столі. Для оцінки будемо вважати, що маса аркуша паперу площею 1 м^2 становить 100 г .

Вага аркуша площею 1 м^2 дорівнює $mg = 0,1 \cdot 9,8 \approx 1 \text{ Н}$. Отже, тиск аркуша паперу $p = \frac{1}{1} = 1 (\text{Па})$. Покладіть на долоню аркуш паперу розміром не більше долоні, і ви почувєте, що таке тиск 1 Па : за «нашою міркою» це зовсім невеликий тиск.

Оцінімо, який тиск на стіл здійснює людина, тиснучи пальцем із силою, що дорівнює вазі кілограмової гирі. Для оцінки будемо вважати, що площа дотику пальця та стола дорівнює 1 см^2 .

Вага кілограмової гирі $mg = 1 \cdot 9,8 \approx 10 \text{ Н}$. Площа дотику пальця до столу дорівнює 10^{-4} м^2 . Отже, тиск пальця $p = \frac{10}{10^{-4}} = 10^5 (\text{Па}) = 10^2 (\text{кПа})$.

Запам'ятаймо це значення тиску — **сто кілопаскалів**: ми не раз ще зустрінемося з ним надалі, тому що таким приблизно є **тиск атмосфери** поблизу поверхні Землі.

3. ТИСК РІДИН

Тиск здійснюють не тільки тверді тіла, але й рідини та гази. Причому тиск рідин і газів має ряд цікавих особливостей, які відрізняють його від тиску твердих тіл. Як ви скоро побачите, особливостями тиску рідини та газу ви користуєтеся щодня!



Проведемо дослід

Візьмемо посудину, у дні та стінках якої є однакові отвори, закриті гумовими плівками, і наллємо в цю посудину воду. Ми побачимо, що **всі** плівки вигнулися назовні (рис. 12.5). Отже, рідина тисне не тільки на дно посудини, а й на її **стінки**!

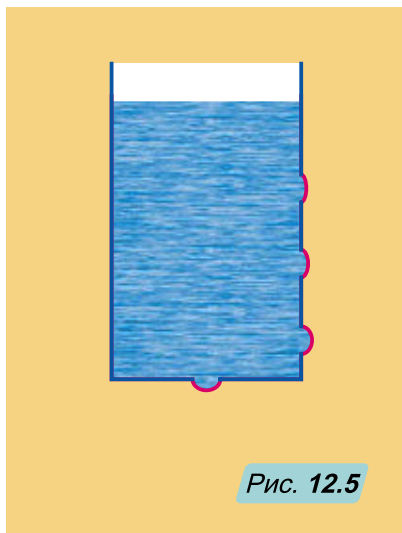


Рис. 12.5

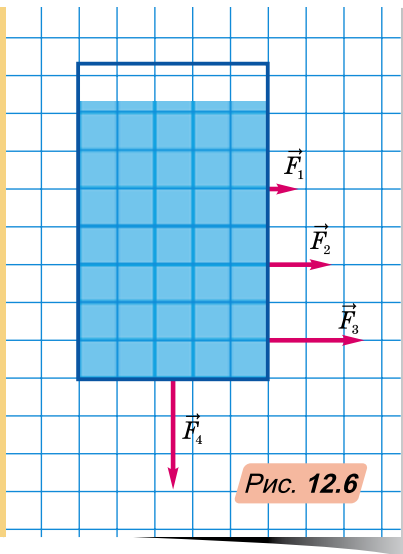


Рис. 12.6

Тиск рідини на стінки посудини зумовлено **плинністю** рідини: під дією сили тяжіння рідина намагається розтектися, зайнявши якомога нижче положення. Стінки посудини утримують рідину від розтікання, примушуючи її набути форми посудини. При цьому стінки посудини тиснуть на рідину, а отже, і рідина тисне на них, причому **сила тиску рідини на будь-яку ділянку поверхні перпендикулярна до цієї ділянки поверхні**.

Так, на горизонтальне дно рідина тисне із силою, напрямленою вертикально вниз, а на вертикальні стінки — із силою, напрямленою горизонтально. На рис. 12.6 схематично зображено сили, з якими рідина тисне на ділянки однакової площі дна та стінок посудини: ці сили завжди напрямлені перпендикулярно до поверхні.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ТИСКУ РІДИНИ ВІД ГЛИБИНИ

Придивившись уважніше, ми помітимо, що плівки, які закривають отвори в стінках посудини, вигнулися по-різному: що більша глибина, на якій розташовано отвір у стінці посудини, то більше вигнута плівка, яка закриває цей отвір.

Отже, **тиск рідини збільшується з глибиною.**

З'ясуємо, як залежить тиск рідини від глибини. Для цього розглянемо тиск рідини на дно посудини з вертикальними стінками. У такій посудині вага всієї рідини припадає тільки на дно посудини, тому що на стінки посудини рідина тисне із силою, напрямленою горизонтально.

Тиск рідини на дно посудини $p = \frac{P}{S}$, де P — вага рідини, S — площа дна посудини. Вага рідини $P = mg$, де m — маса рідини, яка пов'язана з її густиною ρ та об'ємом V формулою $m = \rho V$. Об'єм рідини можна виразити через площу дна S і висоту стовпа рідини h формулою $V = Sh$. Звідси випливає, що $p = \frac{P}{S} = \frac{\rho Shg}{S}$.

Отже,

тиск рідини p на глибині h можна визначити за формулою $p = \rho gh$.



Зазначимо, що виведена формула відноситься тільки до тиску, що його створює сама рідина, і не враховує тиску (наприклад, тиску атмосфери) на поверхню рідини.



На якій глибині створюваний водою тиск дорівнює атмосферному? Будемо вважати, що атмосферний тиск дорівнює 10^5 Па.

Із формули $p = \rho gh$ маємо: $h = \frac{p}{\rho g} = \frac{10^5}{10^3 \cdot 9,8} \approx 10$ (м). Отже, десятиметровий шар води створює майже такий тиск, як шар повітря завтовшки в кілька десятків кілометрів, що оточує Землю!

4. СПОЛУЧЕНІ ПОСУДИНИ

Вільна поверхня рідини, що перебуває в рівновазі, завжди *горизонтальна*, оскільки внаслідок плинності рідина під дією сили тяжіння намагається зайняти якомога нижче положення (рис. 12.7). У тому, що поверхня рідини залишається горизонтальною, легко переконатися, наприклад, нахилиючи склянку з рідиною (рис. 12.8).

А чи залишатиметься поверхня рідини на одному рівні в *різних* посудинах, якщо рідина може перетікати з однієї посудини в іншу? Такі посудини називають *сполученими*.



Проведемо дослід

Закріпимо у штативі U-подібну скляну трубку й почнімо наливати воду в ліве коліно трубки. Коли нижня частина трубки заповниться, вода підніматиметься в *обох* колінах так, що її поверхня в обох колінах буде *на однаковому рівні* (рис. 12.9).

Якщо нахилити трубку, вода частково переллється з одного коліна трубки в інше — причому знову так, що поверхня води в обох колінах буде *на однаковому рівні* (рис. 12.10). Отже, ми встановили на досліді



закон сполучених посудин: у сполучених посудинах, які містять одну рідину, поверхня рідини є на однаковому рівні.

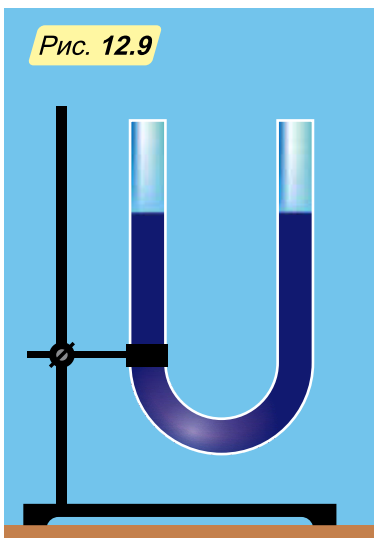


Рис. 12.9

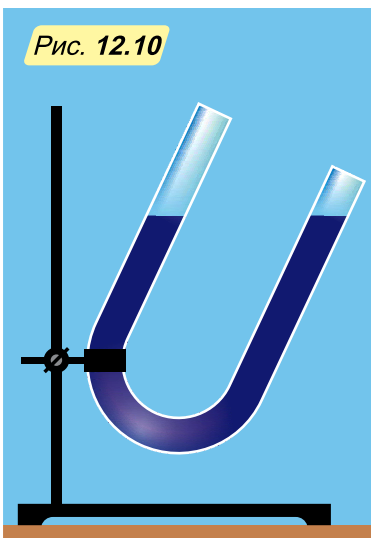


Рис. 12.10

Зверніть увагу: закон сполучених посудин справедливий тільки за умови, що в посудинах міститься **та сама рідина!**

Якщо в сполучені посудини налити **різні** рідини, що не змішуються, то рівень рідин у посудинах може бути різним. Розв'яжемо таку задачу.

Apago PDF Enhancer



В U-подібній трубці містяться вода та олія (рис. 12.11). Висота шару олії дорівнює 10 см. На скільки рівень поверхні олії вищий за рівень поверхні води? Будемо вважати, що густина олії дорівнює $900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

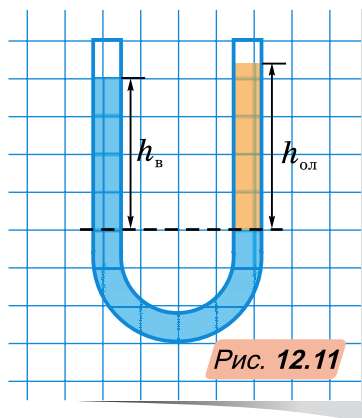


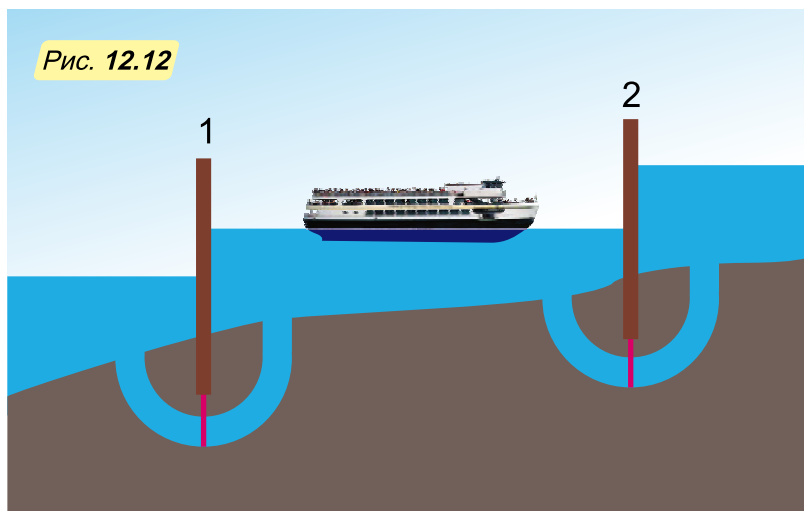
Рис. 12.11

На рівні поверхні поділу олії та води (пунктирна лінія на рис. 12.11) тиск має бути однаковим — у протилежному випадку вода у нижній частині трубки перетікала б у бік меншого тиску. Отже, тиск, створюваний шаром олії, дорівнює тиску, створюваному шаром води над відміченим рівнем. Якщо позначити

висоту шару олії $h_{\text{ол}}$, а вказаного шару води $h_{\text{в}}$, то умова рівності тисків буде такою: $\rho_{\text{ол}} g h_{\text{ол}} = \rho_{\text{в}} g h_{\text{в}}$, де $\rho_{\text{ол}}$ і $\rho_{\text{в}}$ — густина олії та води відповідно. Звідси маємо: $\frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{ол}}} = \frac{\rho_{\text{ол}}}{\rho_{\text{в}}}$, тобто **висоти шарів рідин обернено пропорційні густинам цих рідин**.
 Тому $h_{\text{в}} = h_{\text{ол}} \frac{\rho_{\text{ол}}}{\rho_{\text{в}}} = 0,1 \cdot \frac{900}{1000} = 0,09 \text{ (м)} = 9 \text{ (см)}$. Це означає, що рівень олії на 1 см вищий за рівень води.

ШЛЮЗИ

Для роботи гідроелектростанцій необхідно створити різницю рівнів води в річці. Щоб судна могли рухатися по річці за течією або проти течії, будують **шлюзи**. Шлюз являє собою одну або декілька великих камер, у кожній з яких може розміститися кілька суден одночасно. Камери відділено одну від одної міцними воротами, що щільно зачиняються та можуть витримати перепад висот води в декілька метрів. Під кожними шлюзовими воротами проходить широка труба, яку можна відкривати й закривати. На рис. 12.12 схематично зображено одну з камер шлюзу.



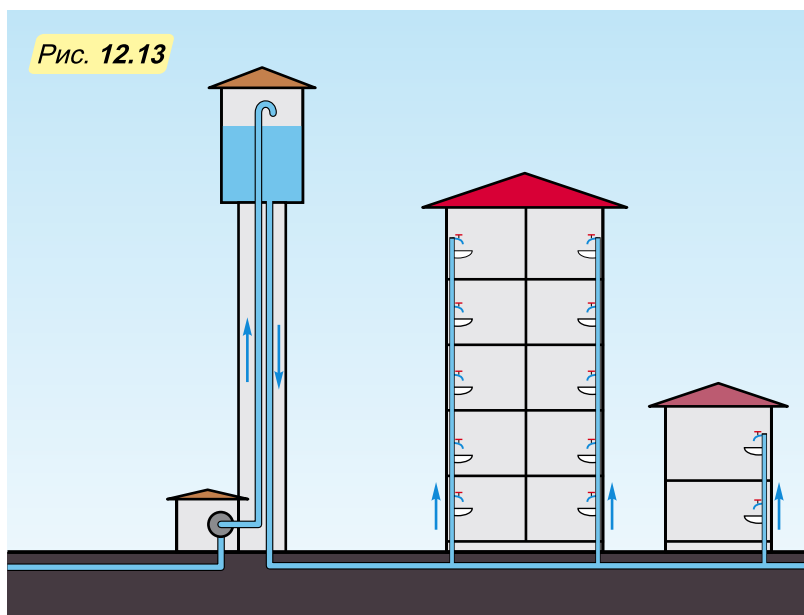


У якій послідовності треба відкривати й закривати труби під воротами 1 і 2, а також ці ворота, щоб зображене на рис. 12.12 судно пройшло вправо? Що треба зробити після цього, щоб відновити попередні рівні води в камерах?

Рухаючись проти течії, судно має перейти із середньої камери до правої, тобто пройти скрізь ворота 2. Щоб можна було відчинити ці ворота, треба спочатку вирівняти рівні води в середній і правій камерах. Для цього потрібно відкрити трубу під воротами 2, щоб ці камери стали сполученими посудинами. Коли рівні води в цих камерах стануть однаковими, відчиняють ворота 2. Після того як судно пройде через ці ворота, їх зачиняють, потім закривають трубу під воротами 2 і відкривають трубу під воротами 1, щоб знизити рівень води в середній камері до попередньої висоти.

ВОДОГІН

На рис. 12.13 зображено схему водогону в невеликому місті. Воду накачують у високу водонапірну башту насосами з ріки або озера. А з башти в будинки вода тече, «підкоряючись» закону сполучених посудин.





Хочеш дізнатися більше?

ЯКИМ Є ТИСК НА ОКЕАНСЬКИХ ГЛИБИНАХ?



Глибина деяких океанських западин сягає 10 км. У скільки разів тиск на такій глибині більший за атмосферний? Будемо вважати атмосферний тиск рівним 10^5 Па.

Згідно з формулою $p = \rho gh$ тиск води на такій глибині дорівнює 10^8 Па. Отже, він у **тисячу разів** більший за атмосферний тиск!

Але й такої глибини змогли досягти дослідники океанських глибин, побудувавши чудовий апарат — **батискаф**, який витримує страшенний тиск океанських глибин (рис. 12.14).

І навіть на великих океанських глибинах учені знайшли риб (рис. 12.15)! Щоправда, привабливими їх не назвеш, але на таких глибинах панує вічна пітьма, і будь вони красиві, їхню красу все одно ніхто б не побачив.



Рис. 12.14

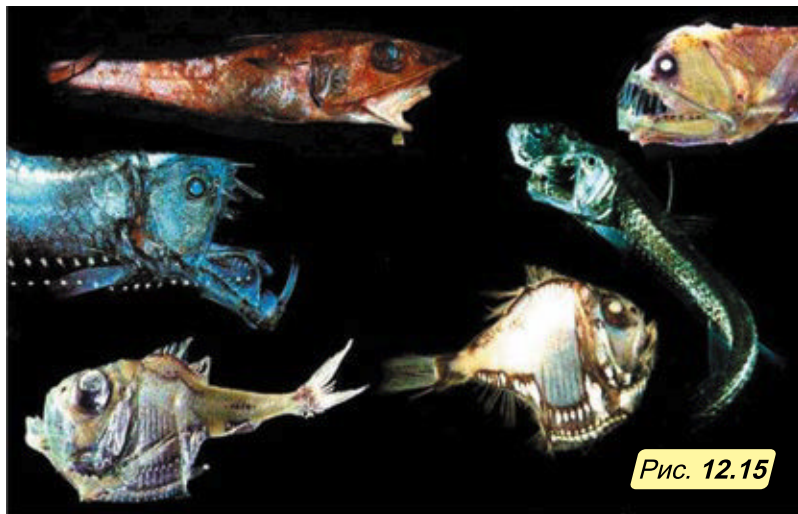
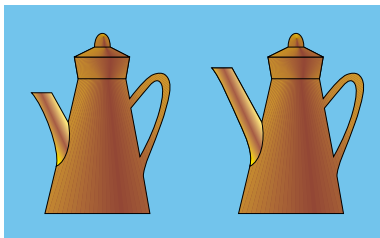


Рис. 12.15

1. Що таке тиск? У яких одиницях його вимірюють? Якими способами можна змінити тиск?
2. Як зміниться сила тиску й тиск людини на підлогу, якщо вона підніме одну ногу? Якщо спробує підняти обидві ноги?
3. Чому гострий ніж ріже краще за тупий?
4. Чому рідина тисне не тільки на дно, але й на стінки посудини?
5. Як залежить тиск рідини від глибини?
6. Сформулюйте закон сполучених посудин.
7. Який із двох кавників справа зображено неправильно? У чому полягає помилка? Обґрунтуйте вашу відповідь.



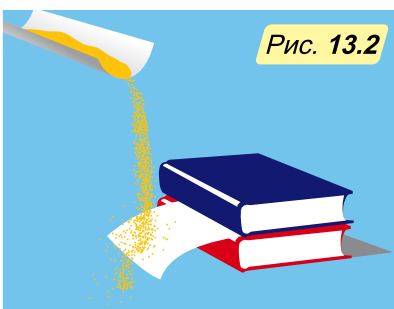
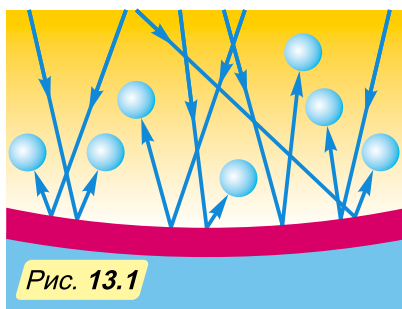
§ 13

ТИСК ГАЗІВ. ЗАКОН ПАСКАЛЯ ДЛЯ РІДИН І ГАЗІВ

1. Тиск газу
2. Закон Паскаля
3. Гідравлічний прес
4. Насоси

1. ТИСК ГАЗУ

Легко переконатися, що не тільки рідина, але й газ тисне на стінки посудини, у якій він міститься. Для цього досить подивитися на надуту повітряну кульку або накачаний м'яч. А ще краще — **торкніться** до них: ви відчуєте тиск повітря, що міститься в них.



Саме існування тиску газу може викликати здивування. Як ви вже знаєте, молекули в газі розташовані не впритул одна до одної, як у твердих тілах і рідинах, а на порівняно великих відстанях, тобто молекули газів не «упираються» одна в одну, а отже, не можуть «упиратися» і в стінки посудини, тиснучи на них. Але чому ж тоді газ усе-таки тисне на стінки посудини?

Річ у тім, що молекули газів не перебувають у спокої, а хаотично (безладно) **рухаються**, причому з доволі високими швидкостями — сотні метрів за секунду (швидкості рушничних куль). При цьому вони, звичайно, стикаються зі стінками посудини (рис. 13.1). Цей дуже частий «барабанний дріб» ударів молекул газу і виявляє себе як постійна сила тиску на стінки посудини.

Проведемо дослід



Переконаємося на досліді в тому, що часті удари невеликих частинок створюють постійну силу тиску.

Сипатимемо на аркуш тонкого картону рівномірним потоком пісок. Ми побачимо, що аркуш картону при цьому деформується — так само, якби на нього діяла **постійна** сила, хоча насправді деформацію картону зумовлено **окремими ударами** піщинок (рис. 13.2).

ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ТИСК ГАЗУ ВІД ОБ'ЄМУ ТА ТЕМПЕРАТУРИ?

Проведемо дослід



Візьміть не сильно надуту повітряну кульку. Якщо ви стиснете її, то об'єм, що його займає повітря, **зменшиться** (рис. 13.3). При цьому ви відчуєте, що тиск повітря в кульці **збільшився**.



Отже, **якщо об'єм газу зменшують, тиск газу збільшується**.

Це легко пояснити, знаючи, що тиск газу зумовлений ударами молекул. Дійсно, у разі зменшення об'єму газу кількість молекул, яка припадає на одиницю об'єму, збільшується, унаслідок чого удари молекул об стінки посудини частішають. Це й приводить до зростання тиску. Звідси стає зрозумілим також, що **в разі збільшення об'єму газу його тиск зменшується**.

Покладемо слабко надуту повітряну кульку в порожню посудину (рис. 13.4). Якщо налити в цю посудину гарячої води, ми помітимо, що кулька трохи надметься (рис. 13.5). Отже, **унаслідок підвищення температури тиск газу збільшується**.



Цю властивість газу легко пояснити, якщо врахувати, що *швидкість хаотичного руху молекул газу залежить від його температури*: що вища температура газу, то більша швидкість молекул. Швидкіші ж молекули *частіше* вдаряються об стінки посудини та до того ж їхні удари *сильніші*. Це й зумовлює збільшення тиску газу.

2. ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Досі, розглядаючи тиск рідини, ми враховували тільки тиск, зумовлений дією сили тяжіння.

Розгляньмо тепер випадок, коли на рідину або газ здійснюють значний тиск — наприклад, поршнем у циліндричній посудині, — причому цей тиск набагато більший за тиск, спричинений дією сили тяжіння (саме цей випадок часто використовують у техніці).

Виникає питання: як передається зовнішній тиск стінкам посудини?



Проведемо дослід

Apago PDF Enhancer

Візьмемо металеву сферу, у якій є невеликі отвори, рівномірно розподілені по всій її поверхні (рис. 13.6). Приєднаємо до сфери трубку з поршнем, наповнимо трубку та сферу забарвленою водою й почнемо із силою тиснути на поршень. Ми побачимо, що з усіх отворів сфери струмені води б'ють однаково сильно. Цей дослід покаже, що зовнішній тиск передається в усі точки рідини.



Те ж саме є справедливим і для газу — у цьому можна переконатися за допомогою тієї самої сфери з трубкою, замінивши воду на дим (струминки диму, які виходять з отворів у сфері, добре видно в повітрі).

Отже, ми доходимо висновку, що

тиск зовнішніх сил на рідину або газ передається в кожну точку рідини або газу.



Уперше цю властивість рідини і газу встановив французький учений Блез Паскаль у другій половині 17-го століття, тому це твердження називають **законом Паскаля**.

МАНОМЕТРИ

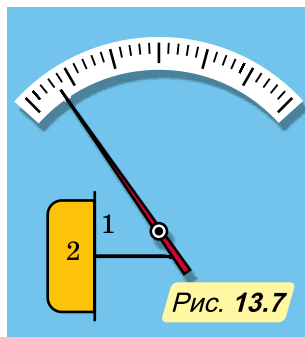
Для вимірювання тиску рідини або газу використовують спеціальні прилади — **манометри**. Назва приладу походить від грецьких слів «манос» — рідкий, нещільний і «метрео» — вимірюю.

Згідно із законом Паскаля тиск в рідині або газі в усіх точках однаковий, тому тиск рідини або газу можна вимірити, помістивши манометр у будь-яку точку рідини або газу.

На рис. 13.7 зображено схему мембранного манометра.

Його дія ґрунтується на тому, що під дією сили тиску рідини або газу пружна мембрана (1), яка герметично закриває порожню коробку (2), трохи прогинається. Прогин мембрани передається стрілці, що вказує значення тиску.

Використовують також рідинні манометри, у яких тиск визначають за різницею висот стовпів рідини в U-подібній трубці.

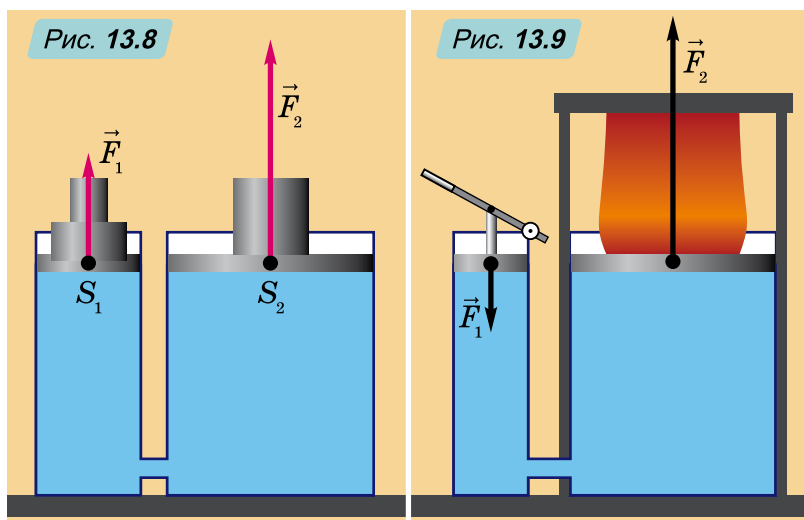


3. ГІДРАВЛІЧНИЙ ПРЕС

Проведемо дослід



Візьмемо сполучені циліндричні посудини різного діаметра, закриті легкими поршнями, які вільно рухаються (рис. 13.8).



Якщо помістити тягарець на поршень, який закриває вузьку посудину, то поршень трохи опуститься. Але щоб відновити однаковість рівнів у посудинах, на «широкий» поршень доведеться поставити *більший* тягарець, ніж той, що стоїть на «вузькому» поршні.

Це легко пояснити, скориставшись законом Паскаля. Згідно з цим законом *тиск* рідини в обох колінах на одному рівні *однаковий*. Але при цьому *сили тиску* рідини на поршні *різні*: при рівності тисків рідина тисне з більшою силою на поршень, який має більшу площу.

Якщо позначити площі поршнів S_1 і S_2 , а сили тиску рідини на ці поршні F_1 і F_2 , то можна записати: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$.

Отже, система двох сполучених циліндрів різних радіусів дозволяє діставати *виграш у силі* — подібно до нерівноплечого важеля. І застосовують цю систему циліндрів так само — для багаторазового збільшення сили (рис. 13.9). Такий пристрій називають *гідравлічним пресом*.

4. НАСОСИ

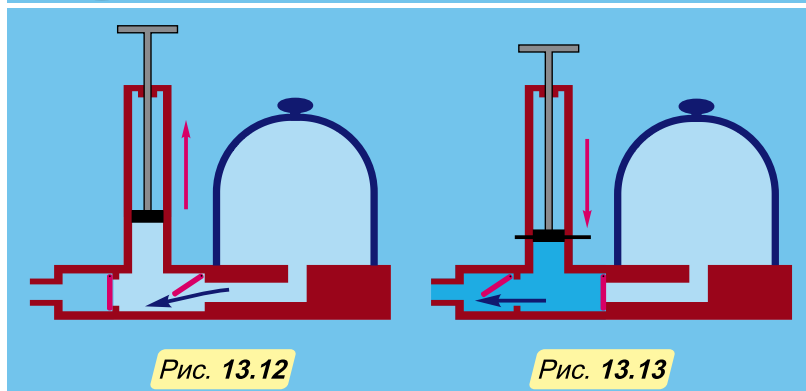
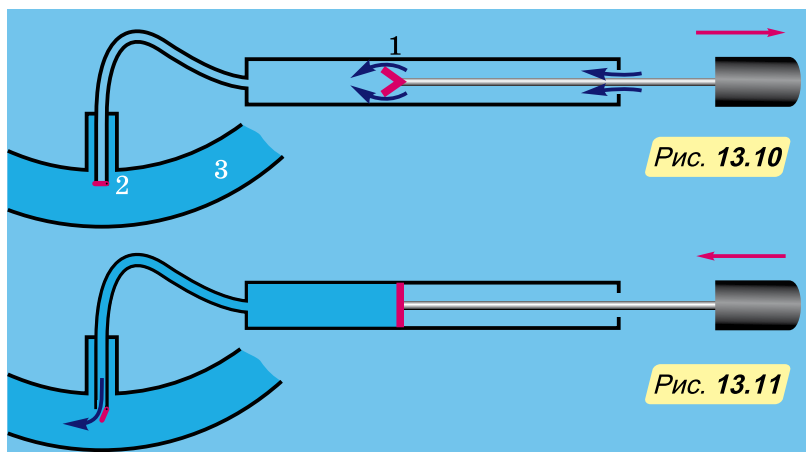
Накачуючи за допомогою насосу велосипедну камеру, ви *підвищуєте* тиск у камері. Головний «секрет» цього насоса — *клапани*, які пропускають повітря лише в *одному* напрямі.

На рис. 13.10–13.11 зображено схему, що пояснює дію велосипедного насоса. Роль одного з клапанів у ньому відіграє сам поршень (1), а роль другого — ніпель (2) у камері (3) велосипедного колеса.

Під час руху поршня вправо поршень «набирає» в насос атмосферне повітря, а ніпель не дозволяє повітрю виходити з камери колеса (рис. 13.10).

Під час руху ж поршня вліво поршень щільно прилягає до стінок насоса, не випускаючи повітря в атмосферу, а ніпель відкривається, пропускаючи стиснене повітря з насоса в камеру (рис. 13.11).

Завдяки такій будові насоса він усмоктує повітря з атмосфери та «вштовхує» його в камеру. Подібні насоси називають **нагнітальними**, бо за їхньою допомогою **збільшують тиск**.



Аналогічно розглянутим повітряним нагнітальним насосам діють і рідинні: у них також використовують клапани, кожен з яких пропускає рідину лише в одному напрямі.

Але існують і насоси, за допомогою яких *зменшують тиск* газу, — такі насоси називають *розріджувальними*. Згадайте, наприклад, насос, за допомогою якого відкачували повітря з-під скляного ковпака, аби переконатись у тому, що для поширення звуку необхідно середовище. Схему дії такого насоса показано на рис. 13.12–13.13.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які спостереження вказують на те, що газ тисне на стінки посудини, у якій він міститься?
2. Яка причина тиску газу?
3. Як залежить тиск газу від його об'єму та температури?
4. Сформулюйте закон Паскаля. Для яких речовин він справедливий?
5. Опишіть дію приладів, за допомогою яких вимірюють тиск. Як називають ці прилади?
6. Що таке гідравлічний прес? На якому законі ґрунтується його дія?
7. Чи супроводжується виграш у силі, коли використовують гідравлічний прес, програшем у переміщенні? Якщо так, то у скільки разів?
8. Порівняйте дію гідравлічного преса з дією важеля. Яка величина відповідає відношенню плечей важеля у випадку гідравлічного преса?
9. Поясніть дію розріджувального насоса, використовуючи рисунки 13.12–13.13.

§ 14

АТМОСФЕРНИЙ ТИСК

1. Атмосфера Землі
2. Дослід Торрічеллі
3. Залежність атмосферного тиску від висоти

1. АТМОСФЕРА ЗЕМЛІ

Як ви вже знаєте з курсів природознавства та географії, Земля оточена повітряною оболонкою, яку називають *атмосферою*. Вона простягається на висоту в декілька тисяч кілометрів і не має чіткої границі: зі збільшенням висоти густина повітря зменшується поступово. На рис. 14.1 ви бачите фото земної атмосфери, зроблене зі штучного супутника Землі.



Рис. 14.1

Отже, ми живемо на дні величезного повітряного океану, дном якого є поверхня Землі. Глибина цього океану сягає тисяч кілометрів!

Цей «повітряний океан» не лише забезпечує нас і всіх тварин на Землі необхідним для дихання повітрям. Незважаючи на свою «повітряність», він є й дуже надій-

ним «щитом». Так, атмосфера захищає Землю від рясних потоків дрібних космічних тіл, метеорів — вони згорають в атмосфері (залишаючи вогненні сліди, які називають «летючими зорями»).

Атмосфера захищає поверхню Землі від тих видів сонячного проміння (наприклад, ультрафіолетового), надлишок яких був би згубним для всього живого.

Унаслідок притягання до Землі атмосфера тисне на її поверхню. Згідно із законом Паскаля тиск атмосфери передається по всіх напрямках, тому атмосфера тисне на всі тіла поблизу поверхні Землі — у тому числі й на кожного з нас. І тиск цей чималий: так, на поверхню долоні атмосфера тисне із силою, що дорівнює вазі дорослої людини (рис. 14.2)!



Рис. 14.2



Чому ми не відчуваємо тиску атмосфери?

Рідини та повітря, що містяться в наших тканинах, також перебувають під тиском, який приблизно дорівнює тиску атмосфери.

Хоч як дивно, але тиск атмосфери залишався непоміченим ученими дуже довго — у його існуванні сумнівався навіть великий Галілей! Але його талановитий учень Еванджеліста Торрічеллі запропонував наочний і переконливий дослід, який підтверджує існування атмосферного тиску. А найбільш ефектний дослід, який переконує в існуванні атмосферного тиску, провів німецький учений Отто фон Геріке. Про ці дослідження ми розповімо пізніше, а поки що опишемо дослід, які ви можете провести самі.



Опустіть у велику каструлю з водою склянку, наповніть її там водою та повільно піднімайте догори дном. Ви побачите: незважаючи на те що склянка піднімається **догори дном**, вода з неї не виливається, поки вінця склянки занурені у воду! Що ж утримує воду в перевернутій склянці?

Її утримує атмосферний тиск: він діє на поверхню води в каструлі, примушуючи воду підніматися за дном склянки.

Повторимо цей дослід, скориставшись скляною трубкою з поршнем. Піднімаючи поршень, ми побачимо, що вода слухняно рухається за ним, заповнюючи трубку (рис. 14.3). Саме так і набирають у шприц рідину. За цим же принципом працюють і насоси, що піднімають воду з колодязів.

До якої ж висоти можна підняти воду поршнем? На жаль, навряд чи вам вдасться перевірити це на досліді в домашніх умовах, навіть якщо ви візьмете трубку завдовжки декілька метрів!

Але будівники колодязів ще за часів Галілея на свій подив виявили, що підняти воду за допомогою поршня більш ніж на 10 метрів **не можна**! І коли вони запитали Галілея, чому це так, він не зміг це пояснити. Розгадку знайшов його учень Торрічеллі. Він зрозумів, що стовп води висотою 10 м створює тиск, який **дорівнює тиску атмосфері**. Ось чому атмосферний тиск не може підняти воду більше ніж на 10 м!

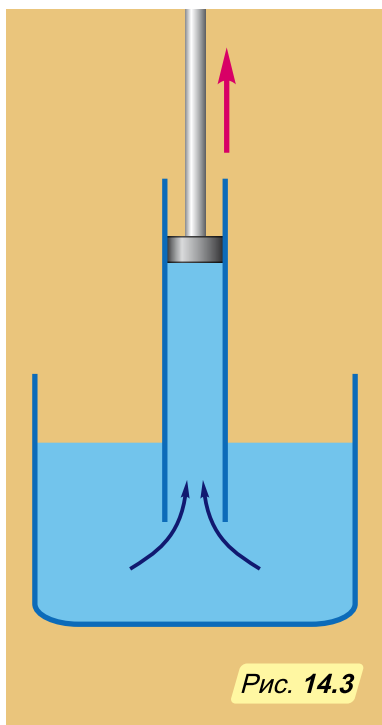


Рис. 14.3

2. ДОСЛІД ТОРРІЧЕЛЛІ

Торрічеллі здогадався, що коли замість води взяти *ртуть*, то дослід з визначення атмосферного тиску можна провести в лабораторних умовах. Дійсно, оскільки густина ртуті в 13,6 разів більша за густину води, то створюваний стовпом ртуті тиск у 13,6 разів більший за тиск, створюваний стовпом води *тієї самої* висоти. Тому для створення того самого тиску, який створює стовп води заввишки близько 10 м, досить стовпа ртуті висотою менше 80 см.

Запропонований Торрічеллі дослід провів один із його учнів. Він заповнив ртуттю запаяну з одного кінця скляну трубку завдовжки близько 1 м, закрив відкритий кінець трубки пальцем і опустив цей кінець в чашу із ртуттю. Коли вчений прибрав палець, ртуть не вилілась уся в чашу: у трубці залишився стовп ртуті висотою близько 760 мм (рис. 14.4). Причому висота цього стовпа при нахилі трубки залишалася незмінною, поки вся трубка не заповнювалася ртуттю, — це вказувало на те, що над ртуттю в трубці немає повітря.

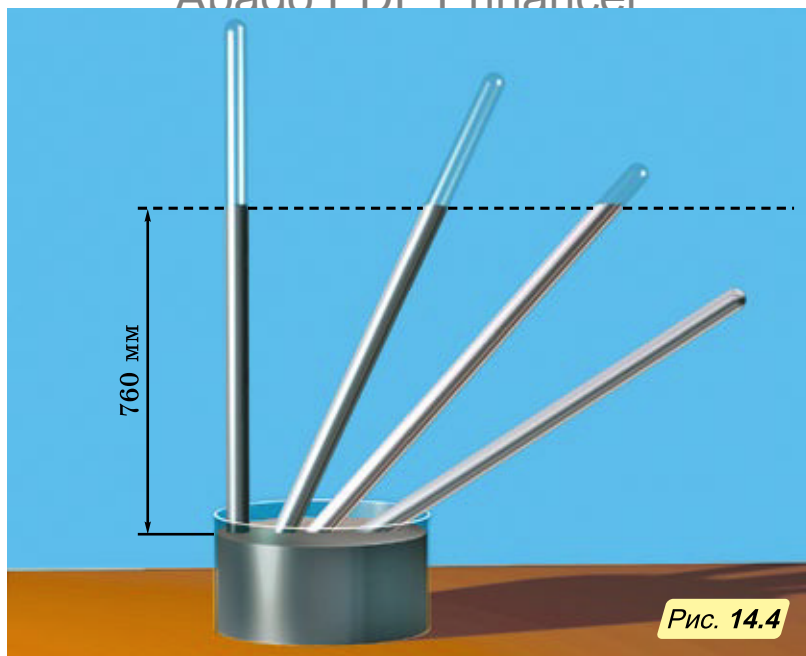


Рис. 14.4

Тепер ми розуміємо, у чому полягає пояснення досліду Торрічеллі: тиск, створюваний стовпом ртуті, дорівнює атмосферному тиску, а тиск стовпа певної рідини залежить лише від його висоти. Однак за часів Торрічеллі описаний дослід багато хто сприймав як фокус. Річ у тім, що більшість учених тоді були переконані, що «природа не терпить порожнечі», але ж у просторі над стовпом ртуті в досліді Торрічеллі була саме **порожнеча** — її навіть назвали «торрічеллієвою порожнечою»! Звичайно, це все-таки не абсолютна порожнеча: у просторі над ртуттю є пари ртуті, однак за кімнатної температури їхній тиск настільки малий порівняно з атмосферним, що ним можна знехтувати.

За допомогою досліду Торрічеллі вдалося не тільки підтвердити **існування** атмосферного тиску, але й **вимірити** його.



Чому дорівнює атмосферний тиск, якщо висота стовпа ртуті в досліді Торрічеллі дорівнює 760 мм? Будемо вважати, що густина ртуті дорівнює $13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Використовуючи формулу для тиску стовпа рідини $p = \rho gh$, маємо: $p = 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,76 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ (Па)} = 101 \text{ (кПа)}$.

Завдяки досліді Торрічеллі тиск атмосфери тривалий час вимірювали висотою ртутного стовпа, який створює такий самий тиск. І нині у зведеннях погоди часто кажуть про тиск у «міліметрах ртутного стовпа». До речі, ми не випадково вибрали в нашій задачі тиск, який дорівнює 760 мм ртутного стовпа: саме такий у середньому тиск атмосфери **на рівні моря** (його називають іноді «нормальним атмосферним тиском»). Як ви вже знаєте, він дорівнює приблизно 10^5 Па .

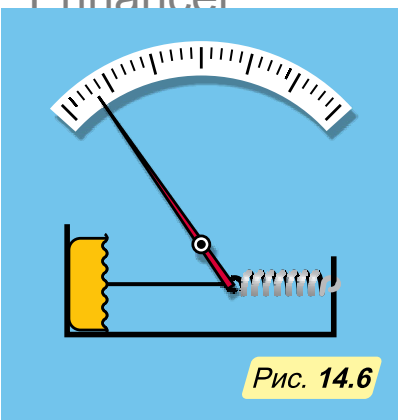
БАРОМЕТРИ

Спостерігаючи протягом кількох місяців за висотою ртутного стовпа, Торрічеллі помітив, що вона то збільшується, то зменшується на декілька сантиметрів, тобто

тиск атмосфери змінюється. Причому зміна атмосферного тиску пов'язана зі зміною погоди: перед погіршенням погоди тиск спадає, а перед поліпшенням — зростає. А це означало, що за зміною атмосферного тиску можна передбачувати погоду! Так з'явилися **барометри** — прилади для вимірювання атмосферного тиску.

Перші барометри відрізнялися від «трубки Торрічеллі», по суті, лише тим, що на трубку зі ртуттю для зручності відліку показів було нанесено шкалу. Однак такі барометри були занадто громіздкими та ламкими, тому для вимірювання тиску винайшли мембранні барометри, які називають **анероїдами** (у перекладі з грецької — безридинні).

На рис. 14.5 зображено барометр-анероїд, а на рис. 14.6 показано схему його дії. Гофрована (хвиляста) мембрана закриває металеву коробку, з якої відпомповано повітря. Коли атмосферний тиск зростає, мембрана прогинається більше, а коли спадає — менше. До мембрани прикріплено стрілку, яка вказує тиск атмосфери.



Як легко помітити, будова барометра-анероїда схожа на будову мембранного манометра. Ця схожість не випадкова: адже барометром, як і манометром, вимірюють тиск, тобто барометр — це манометр, призначений спеціально для вимірювання атмосферного тиску.

3. ЗАЛЕЖНІСТЬ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ВІД ВИСОТИ

Якщо висота змінюється на десятки або сотні метрів, густина повітря змінюється незначно, тому її наближено можна вважати сталою.

Отже, тиск, що його здійснює стовп повітря висотою h , можна знаходити за тією ж формулою, що й для стовпа рідини: $p = \rho gh$, де тепер ρ — густина повітря. Звідси випливає, що коли ми підіймаємося на висоту h , тиск повітря зменшується на ρgh .

На рівні моря густина повітря дорівнює близько $1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, що приблизно в 10 000 разів менше за густину ртуті ($13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

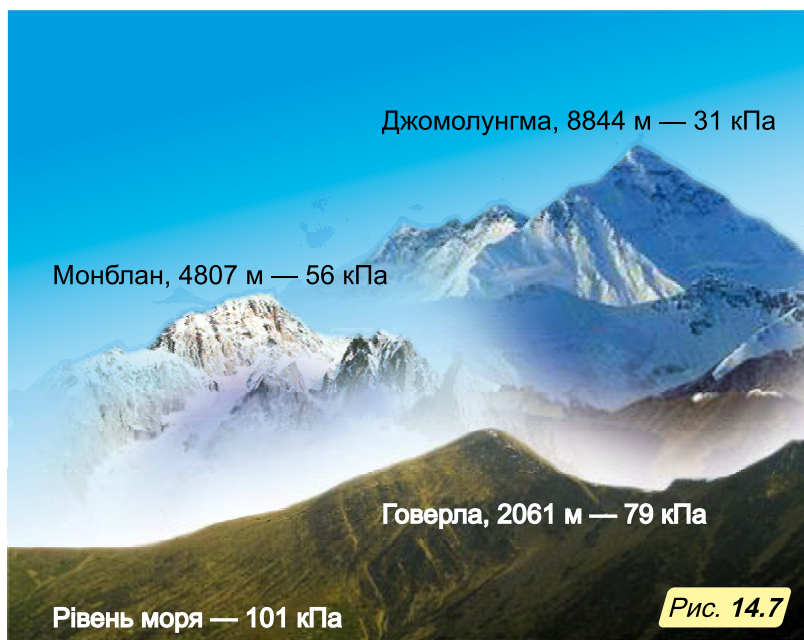
Звідси випливає, що внаслідок підйому в повітрі на 10 м (висота триповерхового будинку) тиск спадає на стільки ж, на скільки спадає тиск унаслідок підйому в ртуті на висоту, у 10 000 разів меншу за 10 м, тобто на 1 мм ртутного стовпа. Тому тиск повітря на верхніх поверхах багатоповерхового будинку менший за тиск повітря на нижніх поверхах на кілька міліметрів ртутного стовпа. А це можна помітити за допомогою звичайного барометра-анероїда.

Радимо вам самостійно переконатися в цьому, якщо ви зможете скористатися таким барометром.

Для великих висот — наприклад, для висот гір — треба враховувати, що зі збільшенням висоти густина повітря зменшується, унаслідок чого тиск зі збільшенням висоти зменшується повільніше, ніж це було б за сталої густини повітря.

Скажімо, у разі підняття на 2 км від рівня моря тиск зменшується приблизно на 20 кПа, а у разі підняття на ті ж 2 км, але з 8 км до 10 км тиск зменшується лише на 9 кПа. У горах, особливо високих, тиск повітря значно менший, ніж на рівні моря.

На рис. 14.7 показано тиск на вершинах деяких відомих гір.



Спадання тиску з висотою використовують для створення **висотомірів**.

Висотомір являє собою, по суті, барометр-анероїд, проградуирований так, щоб ним можна було вимірювати безпосередньо висоту (рис. 14.8).

Для визначення висоти над заданим рівнем (наприклад, над рівнем поверхні моря) треба знати **зміну** тиску порівняно з тиском на цьому рівні, тому перед підніманням стрілку висотоміра встановлюють у нульове положення. Висотоміри використовують, наприклад, альпіністи.





НАЙЕФЕКТНІШИЙ ДОСЛІД З ДЕМОНСТРАЦІЇ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

Такий дослід провів бургомістр німецького міста Магдебурга Отто фон Геріке, що залишив про себе пам'ять скоріше як учений. Цей дослід, що став знаменитим під назвою «Дослід із магдебурзькими півкулями», було проведено 1654 року.

Нижче ми наводимо опис дослідів, зроблених самим Геріке.

«Я замовив дві мідні півкулі діаметра три чверті магдебурзьких ліктя. Але в дійсності їхній діаметр дорівнював усього 0,67 ліктя, бо майстри, зазвичай, не могли виготовити точно те, що було потрібно. В одній півкулі був кран, завдяки якому можна було видаляти повітря зсередини. До півкуль прикріплено було 4 кільця, крізь які протягувалися канати, прив'язані до упряжі коней. Я звелів також зшити шкіряне кільце; воно було просочене сумішшю воску зі скипидаром; затиснуте між півкулями, воно не пропускало в них повітря. У кран було вставлено трубку повітряного насоса, за допомогою якого було видалено повітря з кулі.

Тоді виявилось, з якою силою обидві півкулі притискувалися одна до одної: тиск зовнішнього повітря притискав їх так сильно, що 16 коней (ривком) зовсім не могли їх розняти або насилу рознімали. Коли ж півкулі, уступаючи силі коней, роз'єднувалися, то розлягався гуркіт, як від пострілу. Та варто було поворотом крана відкрити доступ повітрю всередину півкуль — і їх легко було розняти руками».

На рис. 14.9 показано старовинну гравюру, що зображує дослід із магдебурзькими півкулями.

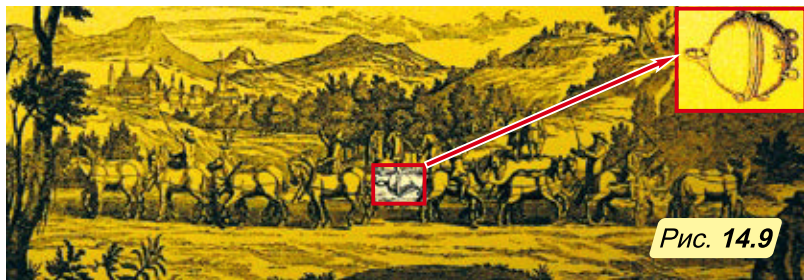


Рис. 14.9

ЧОМУ ПЕРЕД ПОГІРШЕННЯМ ПОГОДИ БАРОМЕТР «СПАДАЄ»?

Коли кажуть, що «барометр спадає», мають на увазі, звичайно, спадання не самого барометра, а зниження тиску атмосфери, яке він показує. Чому ж спадання атмосферного тиску — одна з ознак швидкого погіршення погоди?

Річ у тім, що спадання тиску передвіщає часто наближення **циклону**. Так називають величезні атмосферні вихори діаметра в сотні й тисячі кілометрів із пониженим тиском повітря в центрі. Причиною виникнення циклонів є переважно добове обертання Землі.

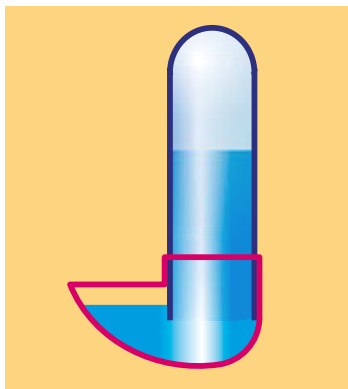
У зону зниженого тиску стрімко рухається повітря із сусідніх зон вищого тиску. Витіснене повітря підіймається вгору, а висхідні потоки повітря спричиняють утворення хмар та опадів.

Зони ж високого тиску «між» циклонами називають **антициклонами**. У цих зонах переважає ясна або малохмарна погода. Улітку там спека, а взимку саме там бувають найсильніші морози!



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Що ви знаєте про атмосферу Землі?
2. Чому, якщо піднімати склянку з води догори дном, вода не виливається зі склянки?
3. Опишіть дослід Торрічеллі. З якою метою було проведено цей дослід?
4. Яку величину вдалося вимірити за допомогою досліду Торрічеллі? Чому вона дорівнює?
5. За допомогою яких приладів вимірюють тиск атмосфери? Опишіть принцип дії цих приладів.
6. Чому тиск атмосфери зменшується з висотою?
7. На рисунку справа схематично зображено поїлку для домашніх птахів. Поясніть принцип її дії.
8. Оцініть, з якою силою атмосферний тиск стискував магдебурзькі півкулі. Для спрощення розрахунку вважайте, що їх можна замінити циліндрами того самого радіуса.



1. Виштовхувальна сила
 2. Закон Архімеда
 3. Гідростатичне зважування
- Хочеш дізнатися більше?
Легенда про Архімеда

1. ВИШТОВХУВАЛЬНА СИЛА

Чи відчували ви, як вода вперто **виштовхує** м'яч, коли намагаєшся втопити його в річці або в морі? Яка ж природа цієї дивної **виштовхувальної сили**? Чи діє вона тільки на тіла, що плавають у воді, або ж вона діє на **всі** частково чи повністю занурені у воду тіла — наприклад, навіть на камінь, який «каменем» іде на дно? Чи можна вимірити цю виштовхувальну силу?

Шукати відповіді на ці запитання ми почнемо, як завжди, з дослідів

Проведемо дослід



Покладіть на воду дерев'яний брусок. Він **плаватиме, перебуваючи у спокої** на поверхні води. А якщо брусок перебуває у спокої, це означає, що **сили, які діють на нього, урівноважують одна одну**. З однією із цих сил ми вже добре знайомі — це напрямлена **вниз** сила тяжіння \vec{F}_T , що діє на брусок із боку Землі. Отже, виштовхувальна сила, що врівноважує її, напрямлена **вгору**, і діє вона **з боку води** (рис. 15.1). Ми позначили виштовхувальну силу \vec{F}_A , оскільки вперше її дослідив давньогрецький учений **Архімед** у 3-му столітті до н. е. Тому виштовхувальну силу часто називають також **силою Архімеда**.

Може здатися дивним, що вода, яка на дотик м'якша за пух, може тиснути знизу вгору. Однак це дійсно так, причому виштовхувальна сила може бути дуже великою: саме вона «утримує на плаву» величезні океанські лайнери (рис. 15.2) і навіть крижані гори — айсберги!

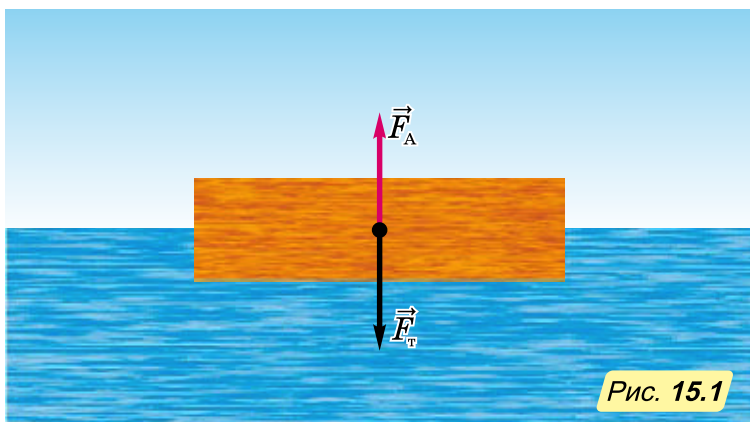


Рис. 15.1

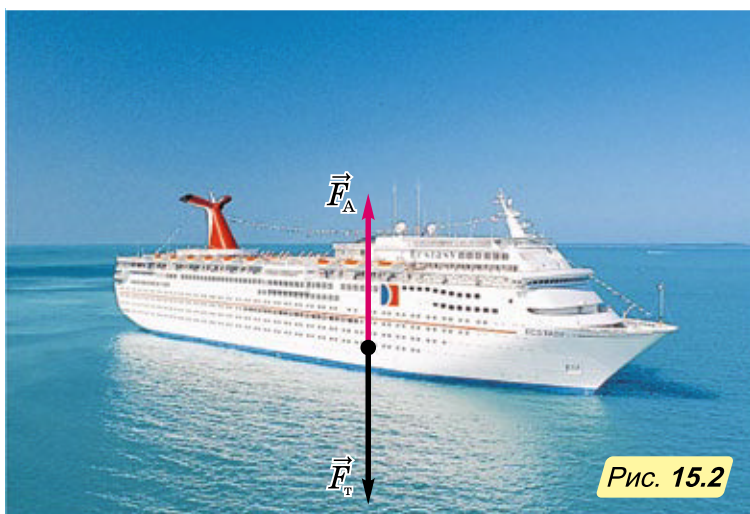


Рис. 15.2

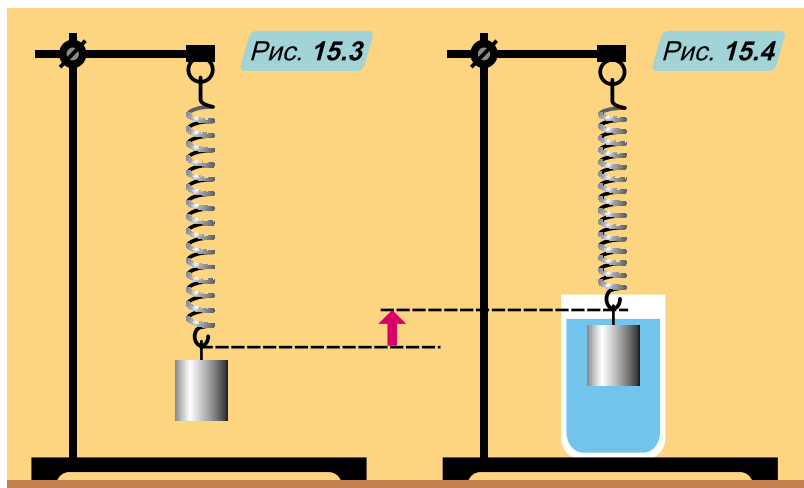
Існування виштовхувальної сили для тіл, що плавають, очевидне: саме завдяки дії цієї сили вони й плавають! А чи буде діяти виштовхувальна сила на тіло, яке **тоне** у воді? Адже якщо тіло **повністю** занурене у воду, вона тисне на тіло й зверху!



Проведемо дослід

Підвісимо до пружини металевий циліндр (рис. 15.3), а потім підставимо під циліндр посудину з водою так, щоб

він повністю зануривсь у воду. Видовження пружини при цьому **зменшиться** (рис. 15.4). А це означає, що виштовхувальна сила діє і на повністю занурене у воду тіло!



Араго PDF Enhancer

2. ЗАКОН АРХІМЕДА

Щоб знайти на досліді значення виштовхувальної сили (сили Архімеда), трохи видозмінимо наш дослід. Підвісимо до пружини невелике порожнє відерце (його називають іноді «відерцем Архімеда») і металевий циліндр (рис. 15.5).

Підставимо під циліндр посудину, у яку налито воду до рівня відливної трубки (рис. 15.6). У разі повного занурення циліндра витіснена ним вода, тобто вода, **об'єм якої дорівнює об'єму циліндра**, виллється по відливній трубці в склянку, а видовження пружини завдяки дії виштовхувальної сили зменшиться.

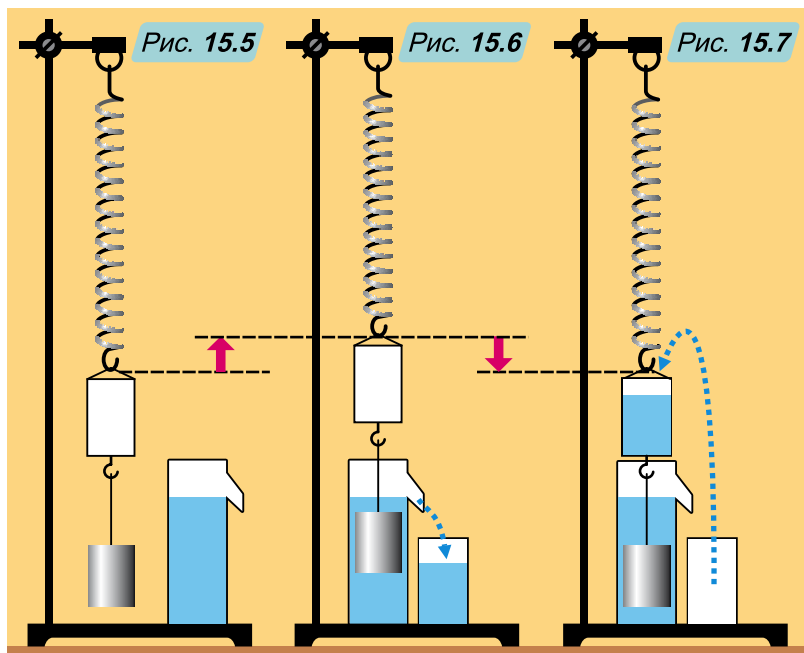
А тепер — головне в цьому досліді! Вилеємо витіснену циліндром воду із склянки у «відерце Архімеда». Ми побачимо, що видовження пружини знову стало **таким самим**, яким воно було до опускання циліндра у воду (рис. 15.7). Це означає, що **виштовхувальна сила, яка діє на циліндр, дорівнює вазі води в об'ємі, зайнятому циліндром**.

Отже, ми доходимо висновку, що



на тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини в об'ємі, зайнятому тілом.

Уперше це було встановлено Архімедом, тому це твердження називають *законом Архімеда*.



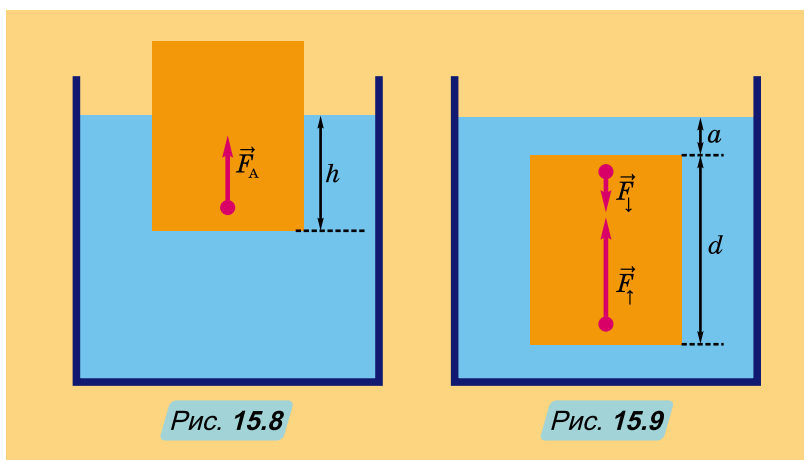
ЯКОЮ Є ПРИРОДА СИЛИ АРХІМЕДА?

Сила Архімеда зумовлена тим, що тиск рідини *збільшується з глибиною*. І тому на нижню поверхню зануреного в рідину тіла рідина тисне з *більшою* силою, ніж на верхню. Унаслідок цього *рівнодійна* сил тиску рідини на *всі* ділянки поверхні тіла направлена *вгору*. Ця рівнодійна і є силою Архімеда.

Для її обчислення розгляньмо спочатку випадок, коли тіло занурене в рідину частково, і для простоти міркувань виберемо тіло, що має форму циліндра.

Позначимо h глибину, на якій перебуває нижня основа циліндра (рис. 15.8). Тиск рідини на цій глибині дорівнює $\rho_p gh$, де ρ_p — густина рідини. Тому напрямлена вгору сила тиску рідини $F_A = \rho_p ghS$, де S — площа основи циліндра. Це і є виштовхувальна сила. Зазначимо, що hS — це об'єм зануреної в рідину частини циліндра, тому, як уже було встановлено на досліді, **виштовхувальна сила $F_A = \rho_p ghS$ дорівнює вазі рідини в об'ємі, зайнятому циліндром.**

Цей висновок залишається в силі й тоді, коли циліндр занурений у рідину повністю, тільки в такому разі виштовхувальна сила зумовлена **різницею** тисків на нижню та верхню основи циліндра (рис. 15.9).



Позначимо a глибину, на якій перебуває верхня основа циліндра, а d — висоту циліндра. Тоді на верхню основу циліндра діє напрямлена **вниз** сила тиску рідини $F_{\downarrow} = \rho_p gaS$, а на нижню основу — напрямлена **вгору** сила тиску рідини $F_{\uparrow} = \rho_p g(a + d)S$. Рівнодійна цих сил $F_A = F_{\uparrow} - F_{\downarrow} = \rho_p gdS = \rho_p gV$, де V — об'єм циліндра, тобто дорівнює вазі рідини в об'ємі всього циліндра.

3. ГІДРОСТАТИЧНЕ ЗВАЖУВАННЯ

Унаслідок занурення у воду тіла, підвішеного до пружинних ваг, їх покази зменшаться завдяки виштовху-

вальної силі. Тому іноді кажуть, що занурене у воду тіло «втрачає у вазі». Насправді, звичайно, ніякої «втрати у вазі» немає: вага P тіла, *що перебуває у спокої, завжди* дорівнює силі тяжіння. Але внаслідок занурення тіла у воду (часткового або повного) вага тіла *перерозподіляється* між *підвісом* — вагами і *опорою* — водою. І тому показ ваг P' дорівнює *різниці* між вагою тіла та модулем виштовхувальної сили. Тільки із цим застереженням можна умовно назвати показ ваг P' «вагою тіла у воді».

Вимірюючи вагу тіла P у повітрі і його «вагу» P' у воді, можна досить просто визначити густину цього тіла. Покажемо, як це можна зробити, на прикладі одного з варіантів легенди про Архімеда.



Якось цар Сіракуз наказав своєму придворному ювеліру зробити корону з чистого золота. Але коли ювелір приніс царю виготовлену ним корону, той запідозрив, що ювелір підмішав у золото срібла, і попросив Архімеда перевірити, чи дійсно це так. Архімед довго думав над цією складною задачею. І знайшов розв'язок! Яким він міг бути?

Щоб з'ясувати, чи з чистого золота зроблено корону, треба визначити її густину та порівняти її з відомою густиною золота.

Густину корони можна визначити за формулою $\rho = \frac{P}{Vg}$, вимірюючи вагу корони P та її об'єм V .

Вагу корони легко знайти зважуванням, але як знайти її **об'єм**? Корона має надзвичайно складну форму, і тому знайти її об'єм за допомогою вимірювання її розмірів та обчислення неможливо. Однак, наслідуючи Архімеда, не будемо здаватися! «Зважимо» корону в повітрі та у воді.

Будемо використовувати сучасні одиниці фізичних величин. Припустимо, що вага P корони в повітрі дорівнює 20 Н, а в разі повного занурення корони у воду виявилось, що її «вага» P' дорівнює 18,7 Н. Отже, виштовхувальна сила $F_A = P - P'$. Згідно із **законом Архімеда** (який було відкрито вченим саме під час виконання цього завдання!) виштовхувальна сила дорівнює вазі води **в об'ємі корони**: $F_A = \rho_v g V$, де ρ_v — густина води. Із співвідношення $\rho_v g V = P - P'$ маємо

$V = \frac{P - P'}{\rho_{\text{в}} g}$. Підставляючи цей вираз для об'єму корони у формулу для густини корони, отримуємо $\rho = \frac{P}{Vg} = \rho_{\text{в}} \frac{P}{P - P'}$.
 Перевіримо одиниці величин і підставимо числові дані. Ми дістанемо $\rho = 10^3 \cdot \frac{20}{20 - 18,7} = 15,4 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$. Це значення густини **менше** за густину золота, що дорівнює $19,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Отже, корону було виготовлено не з чистого золота, тобто ювелір таки намагався обдурити царя!

Описаний спосіб вимірювання густини тіла називають **гідростатичним зважуванням**. Його можна застосовувати, коли густина тіла більша за густину рідини. Як ми бачили, за допомогою цього способу можна визначити **відношення** густини тіла ρ до густини рідини $\rho_{\text{р}}$ за формулою $\frac{\rho}{\rho_{\text{р}}} = \frac{P}{P - P'}$. Це співвідношення дозволяє знайти густину тіла, якщо відома густина рідини, або знайти густину рідини, якщо відома густина тіла.

Хочеш дізнатися більше?



ЛЕГЕНДА ПРО АРХІМЕДА

Про видатного давньогрецького вченого та винахідника Архімеда складали легенди ще за його життя. Згідно з однією з них цар Сіракуз — міста, у якому жив Архімед, — попросив ученого визначити, чи дійсно зроблена для царя корона виготовлена з чистого золота.

Архімед довго міркував над цим завданням: він не бачив способу визначити об'єм корони. Одного прекрасного дня, приймаючи ванну, учений раптом усвідомив, що внаслідок занурення у воду його тіло стає «легшим». І тут у Архімеда сяйнула думка: адже за «втратою ваги» тіла при зануренні його у воду можна визначити об'єм тіла **будь-якої форми!**

Вискочивши з ванни, Архімед помчав вулицями Сіракуз, у захваті волаючи «Еврика!», що в перекладі з грецької означає «Знайшов!». Відтоді слово «еврика» стало в багатьох мовах символом відкриття, осяяння.

Згідно з цим варіантом легенди про Архімеда він, по суті, винайшов спосіб гідростатичного зважування.

Є також інший варіант легенди про Архімеда, згідно з яким він, занурившись у наповнену доверху ванну, здогадався, що об'єм тіла довільної форми можна визначити просто за об'ємом витісненої цим тілом води.

Свої міркування Архімед виклав у книзі «Про плавання тіл». Саме там він і сформулював закон, який має нині його ім'я.

Легенда про Архімеда розкриває образ мислення вченого: у «життєвій справі» він міг розпізнати цікаву наукову проблему.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які спостереження вказують на існування виштовхувальної сили?
2. Сформулюйте закон Архімеда. Якою є природа сили Архімеда?
3. Чому при зануренні у воду тіла, підвішеного до динамометра, показ динамометра зменшується? Чи можна казати, що внаслідок занурення у воду тіло «втрачає у вазі»?
4. У чому полягає метод гідростатичного зважування? Що можна вимірити за його допомогою?

5. Після повного занурення мідної кулі в деяку рідину показ ваг, до яких підвішено кулю, зменшився на 10 %. Чи може ця рідина бути чистим спиртом, якщо густина міді дорівнює $8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а густина спирту дорівнює $800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$?
6. На важільних терезах урівноважили дві кулі — золоту й мідну. Чи порушиться рівновага ваг, якщо занурити їх разом із кулями у воду? Якщо порушиться, то яка куля у воді «переважить»?
7. Мідна та алюмінієва кулі однакової маси лежать на дні басейна з водою. У скільки разів відрізняються виштовхувальні сили, що діють на них? Уважайте, що густина алюмінію дорівнює $2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

1. Плавання однорідних тіл
2. Плавання суден
3. Повітроплавання

1. ПЛАВАННЯ ОДНОРІДНИХ ТІЛ

Чому одні тіла плавають на поверхні рідини (наприклад, дерев'яний брусок у воді), а інші — тонуть (наприклад, сталевий брусок у тій самій воді)?

Щоб відповісти на це запитання, треба порівняти виштовхувальну силу F_A , яка діє на повністю занурене в рідину тіло, із силою тяжіння $F_T = mg$, що діє на те саме тіло. Якщо у разі повного занурення тіла в рідину $F_T > F_A$, то тіло тонути, якщо $F_T < F_A$, то воно виринатиме та плаватиме на поверхні рідини, а якщо $F_T = F_A$, то тіло перебуватиме в рівновазі в рідині.

Для однорідного тіла (виготовленого з однієї речовини або матеріалу) $m = \rho_t V$, де V — об'єм тіла, ρ_t — його густина, тому сила тяжіння $F_T = \rho_t Vg$. Виштовхувальна ж сила $F_A = \rho_p gV$, де ρ_p — густина рідини.

Порівняймо тепер вирази для сили тяжіння F_T та виштовхувальної сили F_A — ви побачите, що вони відрізняються лише тим, що перший містить густину *тіла* ρ_t , а другий — густину *рідини* ρ_p . Звідси отримуємо:



умови плавання однорідних суцільних тіл:

якщо $\rho_t > \rho_p$, то $F_T > F_A \Rightarrow$ тіло тоне,

якщо $\rho_t < \rho_p$, то $F_T < F_A \Rightarrow$ тіло плаває на поверхні рідини,

якщо $\rho_t = \rho_p$, то $F_T = F_A \Rightarrow$ тіло плаває всередині рідини.

Наприклад, сталевий брусок тоне у воді, оскільки густина сталі більша за густину води, але плаватиме у ртуті, оскільки густина сталі менша за густину ртуті. Ось ще приклад.



У ртуть опустили мідну, срібну та золоту кульки. Які з них плаватимуть, а які потонуть?

Густина міді $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, густина срібла $\rho_c = 10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, густина золота $\rho_z = 19,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а густина ртуті $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Порівнюючи ці значення густин, доходимо висновку, що мідна та срібна кульки плаватимуть у ртуті, а золота — потоне.

ПЛАВАННЯ ТІЛ НА ПОВЕРХНІ ВОДИ

Чому соснова колода плаває, занурившись лише наполовину, а айсберг плаває, занурившись у воду майже повністю (рис. 16.1)?

Знайдемо, яка частина об'єму тіла, що плаває, занурена у воду. Позначимо об'єм усього тіла V , а об'єм зануреної у воду частини тіла V' . Виштовхувальна сила $F_A = \rho_v g V'$, де ρ_v — густина води, урівноважує силу тяжіння $F_T = \rho_T V g$. З рівності $\rho_v g V' = \rho_T g V$ випливає, що $\frac{V'}{V} = \frac{\rho}{\rho_v}$. Це співвідношення й дає відповідь на поставлені вище запитання.



Рис. 16.1

Густина сосни приблизно вдвічі менша за густину води, тому соснова колода і плаває, занурившись у воду приблизно наполовину.

А от густина льоду становить приблизно 0,9 від густини води, тому *дев'ять десятих* усього об'єму айсберга перебуває у воді і лише *одна десята* об'єму височіє над поверхнею води. Ось чому айсберги дуже небезпечні для суден.

До наших днів дійшло відлуння страшної трагедії «Титаніка», велетенського пасажирського лайнера, що за-

знав катастрофи 1912 року внаслідок зіткнення з айсбергом в Атлантичному океані. При цьому загинуло понад півтори тисячі людей.

2. ПЛАВАННЯ СУДЕН

Чому плавають судна, виготовлені з матеріалів, які мають густину, більшу за густину води?

Річ у тім, що частина судна, яка перебуває під поверхнею води, містить великі порожнини, унаслідок чого вона витісняє великий об'єм води. Завдяки цьому й виникає велика виштовхувальна сила.

Глибину занурення судна у воду називають *осадкою*. Найбільшу допустиму осадку відмічають на борту судна *ватерлінією*.

Масу судна з максимально можливим вантажем (коли ватерлінія збігається з рівнем води) називають *водотоннажністю* судна. Величезну водотоннажність (до 500 000 т) мають судна для перевезення нафти — танкери. Водотоннажність океанського пасажирського лайнера — десятки тисяч тонн, а невеликої яхти — декілька тонн.

Вантажопідйомність судна дорівнює різниці між його водотоннажністю та масою цього судна без вантажу.



Навіщо підводну частину судна розбивають на відсіки, розділені міцними водонепроникними перегородками?

Якщо у підводній частині борту судна з'явиться отвір (наприклад, унаслідок зіткнення), то водою заповниться тільки один або кілька відсіків. При цьому судно зануриться у воду глибше, але не потоне (рис. 16.2).

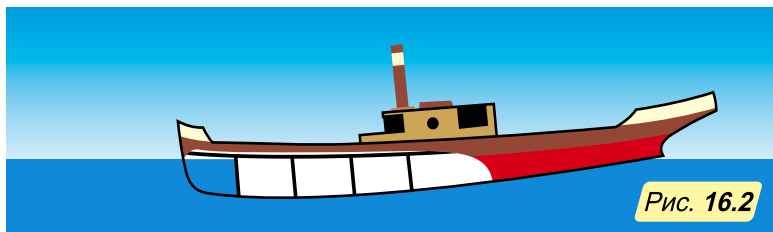


Рис. 16.2

3. ПОВІТРОПЛАВАННЯ

Досліди та розрахунки свідчать, що закон Архімеда є справедливим не тільки для рідин, але й для газів:

на тіло, що перебуває в газі, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі газу в об'ємі тіла.



Існування цієї виштовхувальної сили наочно доводять *повітряні кулі* (рис. 16.3). Саме вона і тримає ці кулі в повітрі, урівноважуючи силу тяжіння.



Рис. 16.3

Виштовхувальна сила в повітрі діє на **всі** тіла, що перебувають у повітрі, — у тому числі й на вас зараз, коли ви читаете ці рядки.

Але помітною виштовхувальна сила в повітрі стає лише тоді, коли вона дорівнює або більша за силу тяжіння, що діє на тіло, — у першому випадку тіло плаває в повітрі, а в другому — злітає вгору.

Величезні розміри повітряних куль можна пояснити порівняно малою густиною повітря. Порівняймо виштовхувальні сили для певного тіла у повітрі та у воді.



Якою є виштовхувальна сила, що діє у повітрі на тіло, об'єм якого дорівнює об'єму кімнати площею 20 м^2 та висотою 3 м ? Порівняймо її з виштовхувальною силою, що діє на те саме тіло, занурене у воду.

Виштовхувальна сила в повітрі дорівнює вазі повітря в заданому об'ємі: $F_1 = \rho_{\text{пов}} g V = \rho_{\text{пов}} g S h$, де S — площа кімнати, h — її висота. Перевіримо одиниці величин і підставимо числові дані: $F_1 = 1,3 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 3 = 780 \text{ (Н)}$. Це — приблизно вага дорослого чоловіка. Виштовхувальна ж сила для тіла такого об'єму у воді $F_2 = \rho_{\text{вод}} g S h$. Перевіримо одиниці величин і підставимо числові дані: $F_2 = 1 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 3 = 6 \cdot 10^5 \text{ (Н)}$. Це вага 15 слонів!

Однак великого об'єму для того, щоб повітряна куля плавала у повітрі, ще не досить! Щоб виштовхувальна сила врівноважувала силу тяжіння, треба, щоб повітряна куля мала ще й досить малу масу, оскільки куля (разом з корзиною та пасажиром) мусить важити **стільки ж**, скільки й повітря того самого об'єму.

Тому повітряну кулю наповнюють газом, який має **меншу густину**, ніж навколишнє повітря. Перші повітряні кулі — монгольф'єри — наповнювали гарячим повітрям: його густина менша за густину атмосферного повітря. Гарячим повітрям наповнюють часто повітряні кулі й нині — його нагрівають газовим пальником, розміщеним під отвором у нижній частині кулі. Такі повітряні кулі використовують в атракціонах і наукових експедиціях. Вони підіймаються на порівняно невелику висоту (сотні метрів).

На велику ж висоту (десятки кілометрів) може піднятися тільки куля, наповнена **воднем** або **гелієм** — газами, густина яких набагато менша за густину повітря. Наприклад, такі кулі-зонди діаметром $1\text{--}2 \text{ м}$ використовують для дослідження верхніх шарів атмосфери. Покази приладів, установлених на цих кулях, передаються по радіо. Отримані таким чином відомості необхідні для передбачення погоди.

Існують і керовані повітряні кулі — **дирижаблі**. Їх використовували під час Першої та Другої світових воєн, а нині використовують для транспортування нестандартних

вантажів, особливо великогабаритних. На рис. 16.4 ви бачите сучасний дирижабль. Щоб уявити його розміри, зверніть увагу на кабінку для пілотів, розташовану в нижній частині дирижабля.



Запитання та завдання для самоперевірки



1. Чим визначається, чи буде суцільне тіло, повністю занурене у воду, тонути або виринати? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
2. Металева кулька тоне у ртуті. З якого металу може бути виготовлена ця кулька?
3. Який висновок про середню густину тіла людини можна зробити з того, що людина може лежати на воді?
4. Чому основна частина айсберга перебуває під водою?
5. Пластина з пінопласту завтовшки 10 см плаває на воді, занурившись на 2 см. Яка густина цього пінопласту?
6. Чи має тіло, що плаває, вагу? Обґрунтуйте вашу відповідь.
7. Чому плавають судна, виготовлені з матеріалів, які мають більшу густину, ніж густина води?
8. Що таке ватерлінія? водотоннажність?
9. Чим можна пояснити величезні розміри повітряних куль?



Головне у цьому розділі

- Тіла діють одне на одне, тобто взаємодіють.
- Унаслідок взаємодії тіл може змінюватись їхня швидкість, а тіла можуть деформуватися. Зміна швидкості тіла або його деформація можуть бути мірою дії на це тіло інших тіл.
- Закон інерції: якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається зі сталою за модулем та напрямом швидкістю або зберігає стан спокою.
- Явищем інерції називають здатність тіла зберігати свою швидкість незмінною, якщо на нього не діють інші тіла.
- Інертністю називають властивість тіла, що визначає, як змінюється його швидкість унаслідок тієї самої дії. Мірою інертності тіла є його маса.
- Маса двох тіл можна порівняти, вимірюючи, як змінюються швидкості тіл унаслідок їхньої взаємодії.
- Сила — векторна величина, що є мірою взаємодії тіл.
- У механіці вивчають взаємодії, зумовлені силами пружності, тяжіння та тертя.
- Силу пружності зумовлено деформацією тіла, тобто зміною його форми.
- Закон Гука: сила пружності $F_{\text{пр}} = kx$, де k — жорсткість пружини.
- Дію на тіло кількох сил можна замінити дією однієї сили, яку називають рівнодією цих сил.
- Якщо дві сили напрямлені однаково, їхня рівнодія напрямлена в той самий бік, а модуль рівнодії дорівнює сумі модулів сил-доданків.
- Якщо дві не однакові за модулем сили напрямлені протилежно, їхня рівнодія напрямлена в бік більшої сили, а модуль рівнодії дорівнює різниці модулів сил-доданків.
- Якщо дві рівні за модулем сили напрямлені протилежно, їхня рівнодія дорівнює нулю. У такому разі кажуть, що ці сили врівноважують (компенсують) одна одну.

- Падіння тіл за відсутності опору повітря називають вільним падінням. Під час вільного падіння всі тіла падають однаково.
- На всі тіла, розташовані поблизу поверхні Землі, діє сила притягання з боку Землі. Цю силу називають силою тяжіння.
- Сила тяжіння прямо пропорційна масі тіла: $F_T = mg$, де $g = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.
- Силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс, називають вагою тіла. Вага тіла, яке перебуває у спокої, дорівнює силі тяжіння, що діє на нього.
- Маса тіл можна вимірювати зважуванням. При цьому способі вимірювання маси використовують те, що сила тяжіння, а разом з нею і вага тіла, що перебуває у спокої, пропорційні масі тіла.
- Стан, за якого вага тіла дорівнює нулю, називають невагомістю. У стані невагомості перебувають усі тіла, що вільно падають.
- Сили тертя ковзання виникають між тілами, що контактують між собою, коли вони рухаються одне відносно одного. Ці сили напрямлені завжди так, що зменшують швидкість відносного руху тіл.
- Сила тертя ковзання $F_{\text{тер}} = \mu N$, де μ — коефіцієнт тертя, N — модуль сили нормального тиску.
- Сила тертя спокою виникає, коли намагаються зсунути одне з тіл, що контактують, відносно другого, і перешкоджає рухові тіл одне відносно одного.
- Сила тертя кочення зазвичай набагато менша від сили тертя ковзання.
- Важелем називають тіло, яке може обертатися навколо нерухомої точки (точки опори).
- Плечем сили називають відстань від точки опори важеля до лінії дії сили.
- Умови рівноваги важеля: 1) прикладені до важеля сили намагаються обертати його в протилежних напрямках; 2) модулі прикладених до важеля сил обернено пропорційні плечам

цих сил: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$.

- Використовуючи важіль, можна дістати виграш у силі — тоді він супроводжується програшем у переміщенні, або виграш у переміщенні — тоді він супроводжується програшем у силі.
- Моментом сили називають добуток модуля сили на її плече: $M = Fl$.
- Правило моментів: під дією двох сил важіль перебуває в рівновазі, якщо момент сили, яка обертає важіль в одному напрямку, дорівнює моменту сили, яка обертає важіль у протилежному напрямку.
- Нерухомий блок не дає виграшу у силі. Він дозволяє змінювати лише напрям дії сили.
- Рухомий блок дає виграш у силі у 2 рази.
- Використовуючи похилу площину, ми виграємо у силі в стільки разів, у скільки разів довжина похилої площини більша за її висоту.
- Тиском p називають відношення сили тиску F , що діє на деяку площу S поверхні, до цієї площі: $p = \frac{F}{S}$. Тиск є скалярною величиною.
- Тиск p рідини на глибині h можна визначити за формулою $p = \rho gh$, де ρ — густина рідини.
- Закон сполучених посудин: у сполучених посудинах, які містять одну рідину, поверхня рідини на однаковому рівні.
- Закон Паскаля: тиск зовнішніх сил на рідину або газ передається без зміни в кожную точку рідини або газу.
- Використовуючи гідравлічний прес, можна дістати виграш у силі, що дорівнює відношенню площ поршнів преса: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$.
- Унаслідок притягання до Землі атмосфера тисне на її поверхню. Тиск атмосфери на рівні моря дорівнює приблизно 10^5 Па.
- Зі збільшенням висоти тиск атмосфери зменшується.
- Закон Архімеда: на тіло, занурене в рідину або газ, діє з боку рідини або газу виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини або газу в об'ємі, зайнятому тілом.

- Виштовхувальна сила є рівнодійною сил тиску рідини на всі ділянки поверхні тіла.
- За допомогою гідростатичного зважування можна визначити відношення густини тіла до густини рідини, у яку занурюють це тіло. Це дозволяє визначити густину тіла, якщо відома густина рідини, або визначити густину рідини, якщо відома густина тіла.
- Умови плавання однорідних суцільних тіл: якщо густина тіла більша за густину рідини, тіло тоне; якщо густина тіла менша за густину рідини, тіло плаває на поверхні рідини; якщо густина тіла дорівнює густині рідини, тіло перебуває в рівновазі, будучи повністю зануреним в рідину.
- Судна плавають тому, що завдяки їхній формі витіснений ними об'єм води набагато більший за об'єм матеріалів, з яких виготовлено судно.
- Повітряні кулі треба наповнювати газом, який має меншу густину, ніж навколишнє повітря.

Apago PDF Enhancer

РОЗДІЛ 3

РОБОТА ТА ЕНЕРГІЯ

- § 17. Механічна робота
- § 18. Енергія
- § 19. Машини та механізми.
Потужність
- § 20. Від великої омани
до великого відкриття



1. Механічна робота
2. Коли робота дорівнює нулю?
3. Робота різних тіл

1. МЕХАНІЧНА РОБОТА

Успіхи фізики та техніки, досягнуті в 17-му й 18-му століттях, приносили свої плоди. На початку 19-го століття на заводах і фабриках уже працювали різні машини, залізницями гуркотіли перші паровози, а моря та ріки борознили перші пароплави. Усі вони рухалися за допомогою **двигунів**.

Дія будь-якого двигуна полягає в тому, що з боку двигуна до певного тіла прикладається **сила**, причому точка прикладання цієї сили **переміщується** в напрямі дії сили. Наприклад, **піднімаючи** вантаж, необхідно не лише прикладати до нього напрямлену вгору силу, але й переміщувати точку прикладання цієї сили вгору. Тому для **підняття** вантажу потрібен **двигун**. Роль двигуна може виконувати як жива істота — нею може бути, наприклад, людина (рис. 17.1), — так і машина (підймальний кран).

А ось для того, щоб **тримати** вантаж на **сталій** висоті, двигун зовсім не потрібен, навіть якщо це висота великої гори (рис. 17.2)! Вантаж може тримати опора, і хоча при цьому з боку опори на вантаж постійно діє напрямлена вгору сила, точка прикладання цієї сили **не переміщується**.

На початку 19-го століття французький учений Віктор Понселе писав: «Дії, що їх виконують різні двигуни та машини, нескінченно різноманітні. Щоб мати можливість порівнювати їх між собою, треба ввести величину, яка для всіх двигунів була б спільною мірою». Такою мірою Понселе запропонував уважати **добуток сили на переміщення точки її прикладання**. Таку величину він назвав **механічною роботою**.

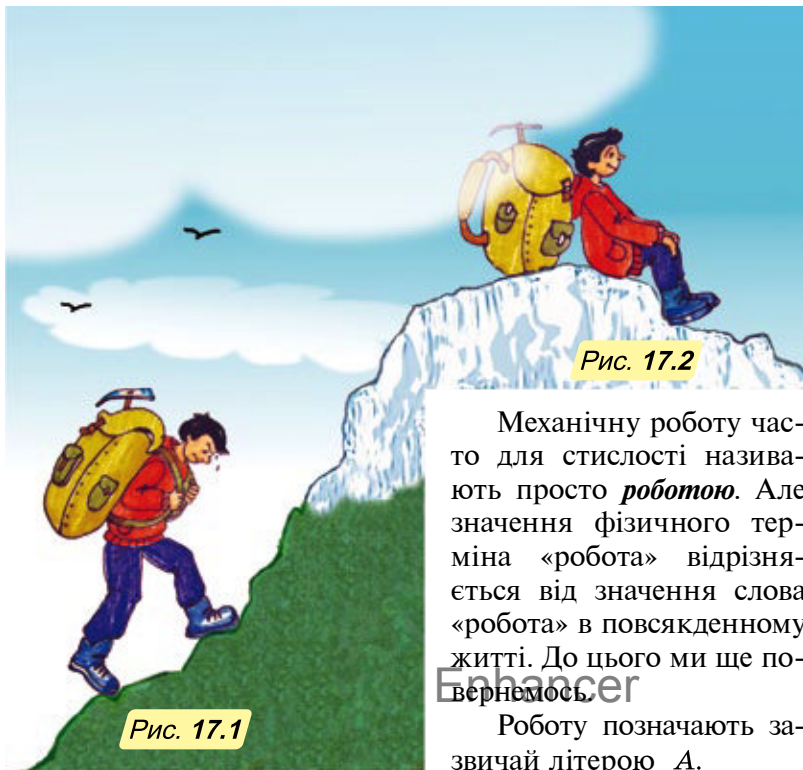


Рис. 17.1

Рис. 17.2

Механічну роботу часто для стислості називають просто **роботою**. Але значення фізичного терміна «робота» відрізняється від значення слова «робота» в повсякденному житті. До цього ми ще повернемося.

Роботу позначають зазвичай літерою A .

Якщо напрям сили \vec{F} збігається з напрямом переміщення \vec{s} точки прикладання сили, робота A дорівнює добутку модуля сили на модуль переміщення: $A = Fs$.

Одиницею роботи, як випливає з означення, є $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тобто робота, що її виконує сила 1 Н , коли точка прикладання сили переміщується на 1 м у напрямі дії сили. Одиницю роботи назвали джоуль (Дж) на честь англійського фізика Джеймса Прескотта Джоуля. Отже, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Щоб дістати уявлення про одиницю роботи, розв'яжемо задачу.



Яку роботу необхідно виконати для рівномірного піднімання повного відра води на 1 м ? Будемо вважати, що маса відра з водою дорівнює 10 кг .

Для рівномірного піднімання до відра треба прикладати силу F , яка дорівнює за модулем силі тяжіння mg . Отже, щоб підняти відро на висоту h , треба виконати роботу $A = Fh = mgh$.

Перевірівши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо: $A = 10 \cdot 9,8 \cdot 1 \approx 100$ (Дж).

Із цього прикладу видно, що за «людськими мірками» 1 Дж — невелика робота. Тому в могутній сучасній техніці використовують такі похідні одиниці роботи, як кілоджоуль ($1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}$) і навіть мегаджоуль ($1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$). Уявлення про такі одиниці дає така задача.



З греблі Дніпрогесу щосекунди падає приблизно 1500 м^3 води з висоти близько 40 м (рис. 17.3). Оцінімо, яку роботу виконує щосекунди сила тяжіння, яка діє на цю воду.

У разі падіння тіла масою m з висоти h сила тяжіння mg виконує роботу $A = mgh$. У цьому випадку $m = \rho V$, де ρ — густина води, V — об'єм води, що падає протягом однієї секунди. Отже, $A = \rho Vgh$.

Перевірівши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо: $A = 10^3 \cdot 1500 \cdot 9,8 \cdot 40 \approx 600 \cdot 10^6$ (Дж) = 600 (МДж).



Рис. 17.3

Сила, що діє на тіло, може бути напрямлена і *проти-лежно* переміщенню.

Киньте, наприклад, м'яч вертикально вгору. Протягом *усього польоту* м'яча на нього діє сила тяжіння, напрямле-

на **вниз**, тому під час руху м'яча вгору ця сила напрямлена протилежно переміщенню.

Чому ж дорівнює робота сили в такому разі?

Якщо напрям сили \vec{F} протилежний напрямку переміщення \vec{s} точки прикладання сили, робота A цієї сили від'ємна й дорівнює добутку модуля сили на модуль переміщення зі знаком «мінус»: $A = -Fs$.

2. КОЛИ РОБОТА ДОРІВНЮЄ НУЛЮ?

ПЕРЕМІЩЕННЯ ДОРІВНЮЄ НУЛЮ

Із формули для роботи сили $A = Fs$ випливає, що в разі, коли хоча б **один** із співмножників (сила F або переміщення s) дорівнює нулю, робота дорівнює нулю — **незалежно від величини іншого співмножника**. Отже, робота дорівнює нулю, якщо переміщення дорівнює нулю.

Розгляньмо приклад з міфології та архітектури.



Рис. 17.4

Давньогрецькі міфи розповідають про могутнього титана Атланта, який удень та вночі тримав на своїх плечах небесний звід. Титан дуже втомлювався, але чи дійсно він виконував **механічну** роботу?

Механічної роботи Атлант не виконував, бо переміщення вантажу, який він тримав («небесного зводу»), дорівнює **нулю**. Тому Атланта можна було б замінити його кам'яною статуєю.

І насправді, кам'яні статуї атлантів століттями тримають вантаж, не знаючи втоми (рис. 17.4)!

У відомій пісні про кам'яних атлантів стверджується, що їхня тяжка **робота** — важливіша за інші роботи. Автор пісні — учений, який добре розуміє значення **терміна** «ро-

бота». Але він свідомо вжив слово «робота» в житейському значенні, оскільки, тримаючи важкий тягар, людина насправді дуже втомлюється.

Чому ж тоді виникає ця втома? Річ у тім, що коли людина тримає вантаж, її м'язи постійно напружені. Саме цим і зумовлена втома. Наприклад, якщо людина триматиме той самий вантаж на колінах, вона втомиться набагато менше, тому що навантаження буде припадати не на м'язи, а на кістки.

Цей приклад добре ілюструє, що коли для наукового **терміна** вибрано слово з розмовної мови, це може призвести до непорозумінь. Наприклад, у побуті ми часто вживаємо слово «робота» як синонім слова «праця»: так ми кажемо про роботу вченого, письменника або школяра. Але якою б трудною не була, скажімо, контрольна **робота** з математики чи з фізики, вона майже не потребує **механічної роботи!**

СИЛА ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА ДО ПЕРЕМІЩЕННЯ

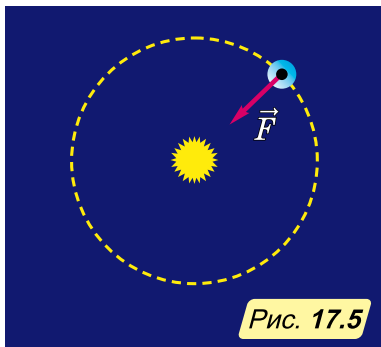
Робота дорівнює нулю й тоді, коли **сила перпендикулярна до переміщення**, адже в ньому разі переміщення тіла в напрямі дії сили також дорівнює нулю.

Наприклад, під час руху планети по орбіті навколо Сонця на планету діє сила притягання з боку Сонця — саме завдяки дії цієї сили траєкторія планети і є коловою (рис. 17.5).

Однак сила притягання Сонця напрямлена перпендикулярно до переміщення планети за малий проміжок часу — і тому робота цієї сили дорівнює нулю.

Отже, Сонце не є «двигуном»: воно не «штовхає» й не «тягне» планету в напрямі її руху, а тільки повертає напрям її швидкості.

Дорівнює нулю й робота сили тяжіння, що діє на тіло, яке рухається горизонтально (рис. 17.6), оскільки при цьому сила тяжіння перпендикулярна до переміщення тіла.



Отже,



робота дорівнює нулю, якщо переміщення тіла дорівнює нулю або сила, яка діє на тіло, напрямлена перпендикулярно до переміщення.



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**.

Наприклад, якщо тіло масою m опускається з висоти h , 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**.

Так, під час піднімання тіла масою m на висоту h робота сили тяжіння $A = -mgh$.

РОБОТА СИЛИ ПРУЖНОСТІ

1. Коли **стиснута пружина розпрямляється**, сила пружності, що діє з її боку, напрямлена так само, як переміщення, тому робота сили пружності додатна. Зауважимо,

що в цьому разі деформація пружини зменшується, тобто *у разі зменшення деформації сила пружності пружини виконує додатну роботу*.

2. Коли ми *стискаємо нездеформовану пружину*, сила, що діє з боку пружини, напрямлена протилежно деформації. Отже, *у разі збільшення деформації сила пружності пружини виконує від'ємну роботу*.

РОБОТА СИЛИ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ ТА КОЧЕННЯ

Сила тертя ковзання або кочення напрямлена завжди протилежно швидкості, а отже, і переміщенню тіла, тому *робота сили тертя ковзання або кочення від'ємна*.

У результаті дії цих сил тертя *швидкість тіла зменшується*. Наприклад, якщо штовхнути брусок, що лежить на столі, він почне рухатися. Але під час руху на брусок діє сила тертя ковзання, напрямлена протилежно переміщенню бруска. У результаті швидкість бруска зменшуватиметься, аж поки брусок не зупиниться.

Зверніть увагу на істотну відмінність сил тертя ковзання та кочення від сил тяжіння та пружності. У результаті дії сили тяжіння або пружності швидкість тіла може як *збільшуватися*, так і *зменшуватися*: у першому випадку робота додатна, у другому — від'ємна. А в результаті дії сили тертя ковзання або кочення швидкість тіла завжди *зменшується*: робота цих сил завжди від'ємна.

РОБОТА КІЛЬКОХ СИЛ

Якщо на тіло, що рухається, діє *кілька* сил, то кожна з них може виконувати роботу. Розгляньмо, наприклад, таку задачу.



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?

На вантаж діють сила тяжіння \vec{F}_t і сила пружності $\vec{F}_{\text{пр}}$. Оскільки вантаж рухається рівномірно, ці сили врівноважують одна одну, тобто однакові за модулем і протилежні за напрямом. Кожна з них дорівнює за модулем mg , де m — маса вантажу. Під час піднімання вантажу вгору на висоту h сила тяжіння виконує від'ємну роботу $A_t = -mgh$, а сила пружності — додатну роботу $A_{\text{пр}} = mgh$.

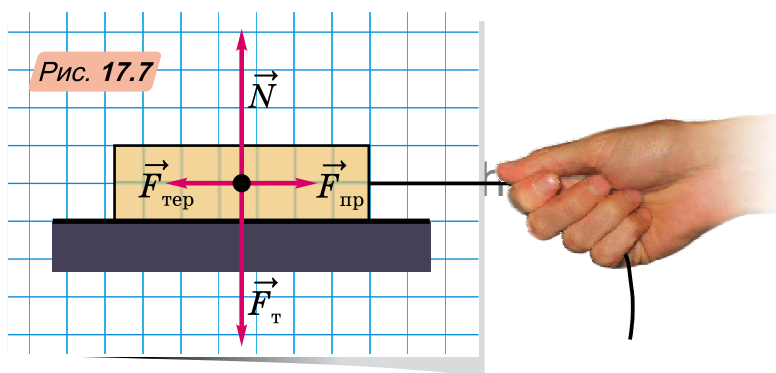
Перевірівши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:
 $A_{\text{т}} = -100 \cdot 9,8 \cdot 10 \approx -10^4$ (Дж), $A_{\text{пр}} = 100 \cdot 9,8 \cdot 10 \approx 10^4$ (Дж).

Зверніть увагу: під час піднімання вантажу на нього діяли дві сили, причому робота однієї з цих сил додатна, а другої — від'ємна.

А ось приклад задачі, в якій треба знайти роботу кількох сил, напрямлених горизонтально та вертикально.



Брусок тягнуть за допомогою горизонтально напрямленої нитки по горизонтальному столу. Які сили діють при цьому на брусок? Чому дорівнює робота кожної з них, якщо маса бруска 0,5 кг, пройдений ним шлях дорівнює 1 м, а коефіцієнт тертя між бруском і столом дорівнює 0,2? Будемо вважати, що брусок рухається рівномірно.



На брусок діють сила тяжіння $\vec{F}_\text{т}$, сила нормальної реакції \vec{N} з боку стола, сила тертя ковзання $\vec{F}_\text{тер}$ та сила пружності $\vec{F}_\text{пр}$ з боку нитки (рис. 17.7). Брусок рухається рівномірно, тому сила нормальної реакції компенсує силу тяжіння, а сила тертя — силу пружності з боку нитки. Звідси $N = mg$, $F_\text{пр} = F_\text{тер} = \mu N = \mu mg$. Під час горизонтального руху бруска робота сили тяжіння та робота сили нормальної реакції дорівнюють нулю, бо ці сили напрямлені перпендикулярно до переміщення бруска.

Робота сили тертя від'ємна: $A_\text{тер} = -F_\text{тер}s = -\mu mgs$, де s — модуль переміщення бруска, а робота сили пружності додатна: $A_\text{пр} = F_\text{пр}s = \mu mgs$.

Перевірівши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:

$$A_{\text{тер}} = -0,2 \cdot 0,5 \cdot 9,8 \cdot 1 \approx -1 \text{ (Дж)}, \quad A_{\text{пр}} = 0,2 \cdot 0,5 \cdot 9,8 \cdot 1 \approx 1 \text{ (Дж)}.$$

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Чому дорівнює робота сили, коли напрям сили збігається з напрямом переміщення? Коли сила напрямлена протилежно переміщенню?
2. У яких випадках механічна робота дорівнює нулю? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
3. Чи може робота сили бути від'ємною? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
4. Чому дорівнює робота сили тяжіння під час руху тіла вгору? униз?
5. Додатною чи від'ємною є робота сили пружності в разі стискання нездеформованої пружини? у разі розтягнення?
6. У якому разі робота сили пружності від'ємна?
7. Додатною чи від'ємною є робота сили тертя ковзання? Обґрунтуйте вашу відповідь.
8. Чи може одна з двох сил, які діють на тіло, що рухається, виконувати додатну роботу, а друга — від'ємну? Наведіть приклад, який ілюструє вашу відповідь.
9. Оцініть, яку роботу ви виконуєте, піднімаючись на третій поверх.

1. Енергія
 2. Механічна енергія
 3. Коли зберігається механічна енергія?
 4. Закон збереження енергії
- Хочеш дізнатися більше?
Як було відкрито закон збереження енергії?

1. ЕНЕРГІЯ

Розгляньмо приклади, коли роботу виконують сили, що діють з боку певного тіла.

1. Під час розпрямлення стиснутої пружини сила пружності, що діє з боку пружини, виконує роботу. Отже, **стиснута (здеформована) пружина має здатність виконувати роботу**. Цю властивість пружини використовують, наприклад, у пружинному годиннику та заводних іграшках.

2. Вантаж, який опускається з деякої висоти, також виконує роботу: це використовують, наприклад, у годиннику з гилями та на гідроелектростанціях, де роботу виконує вода, що падає з греблі. Отже, **піднятий на деяку висоту вантаж має здатність виконувати роботу**.

3. Тіло, що рухається з деякою швидкістю, під час гальмування виконує роботу. Наприклад, якщо візок, що їде по столу, зіштовхнеться з пружиною, пружина деформується. Отже, **тіло, що рухається, має здатність виконувати роботу**. Унаслідок цього рух часто передається від одного тіла другому: так, струмінь пари, ударяючи в лопаті колеса парової турбіни, обертає колесо турбіни, а швидкість струменя пари при цьому зменшується.



Фізичну величину, що характеризує здатність тіла або системи тіл виконувати роботу, називають енергією.

Коли тіло виконує роботу, його енергія зменшується на величину, що дорівнює виконаній роботі: якщо позначити

енергію тіла в початковому стані $E_{\text{поч}}$, у кінцевому стані $E_{\text{кін}}$, а виконану тілом роботу позначити A_T , то

$$A_T = E_{\text{поч}} - E_{\text{кін}}.$$

Звідси випливає, що **одиниця енергії така сама, як і одиниця роботи, — джоуль.**

Що більшу роботу може виконати тіло, то більша його енергія. Це відповідає уявленню про енергію і в повсякденному розумінні: так, про людину, яка може виконати велику роботу, кажуть як про енергійну людину.

Досі ми розглядали приклади, коли енергія тіла **зменшується**. Але вона може і **збільшуватись**. Розглянемо приклади.

1. Стискуючи нездеформовану пружину, ми збільшуємо її енергію, оскільки що більша деформація пружини, то більшу роботу може ця пружина виконати.

2. Піднімаючи вантаж, ми теж збільшуємо його енергію.

3. Енергія автомобіля збільшується, коли він розганяється, тобто збільшує швидкість.

Arago PDF Enhancer

2. МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ

Нині встановлено, що енергія може існувати в різних формах.

Наприклад, є механічна енергія, внутрішня енергія, хімічна енергія, атомна енергія, електроенергія тощо.

Ми вивчатимемо поки що **механічну** енергію, яка залежить від **швидкостей тіл і взаємного положення тіл або частин тіла, що взаємодіють**.

Механічну енергію поділяють на **потенціальну** та **кінетичну**.

Потенціальною енергією тіла називають частину механічної енергії, яку визначає взаємодія цього тіла з іншими тілами (або взаємодія частин тіла).



Позначатимемо потенціальну енергію $E_{\text{п}}$. **Потенціальна енергія змінюється внаслідок зміни взаємного розташування тіл, що взаємодіють.**



Кінетичною енергією тіла називають частину механічної енергії, яку визначає рух тіла.

Розрахунки показують, що



кінетична енергія тіла $E_k = \frac{mv^2}{2}$, де m — маса тіла, v — модуль швидкості тіла.

Отже, кінетична енергія тіла змінюється, коли змінюється швидкість тіла.

Розгляньмо приклади.

1. Коли змінюється висота вантажу, змінюється його положення **відносно Землі, з якою вантаж взаємодіє** (Земля притягує вантаж). Отже, енергія піднятого вантажу зумовлена **взаємодією** цього вантажу із Землею, тобто **енергія піднятого вантажу — це потенціальна енергія**. Знайдемо, чому вона дорівнює.

У разі опускання вантажу масою m з висоти h він виконує роботу $A = mgh$, отже, потенціальна енергія вантажу **зменшується** на mgh . Уважатимемо, що потенціальна енергія вантажу в **кінцевому** стані дорівнює **нулю**. Тоді



потенціальна енергія піднятого вантажу $E_p = mgh$.

Нульовий рівень потенціальної енергії визначають виходячи з міркувань зручності: зазвичай його зіставляють з найнижчим можливим положенням вантажу. Наприклад, якщо вантаж опускається на Землю, то нульовому рівню відповідає положення вантажу на рівні Землі. Якщо ж дослід проводять над лабораторним столом, то за нульовий рівень приймають рівень стола.

2. Здеформована пружина має енергію. Коли деформація пружини зменшується, роботу виконує сила пружності пружини, зумовлена **взаємодією** між атомами речовини, з якої виготовлено пружину. Отже, **енергія zdeформованої пружини — це потенціальна енергія**.

У курсі фізики старших класів буде отримано вираз для цієї енергії.

Енергія може перетворюватися з однієї форми в іншу. Розгляньмо, наприклад, падіння вантажу. Під час падін-

ня висота вантажу над поверхнею Землі зменшується, а швидкість вантажу збільшується. Отже, під час падіння вантажу його потенціальна енергія зменшується, а кінетична — збільшується.

Чи залишається **сума** цих енергій сталою? До цього питання ми зараз і перейдемо.

3. КОЛИ ЗБЕРІГАЄТЬСЯ МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ?

Почнемо з розгляду найпростішого руху тіла — *руху за інерцією*.

Як ви пам'ятаєте, так називають рух тіла, коли на це тіло не діють інші тіла або дію інших тіл компенсовано. У такому разі згідно з уже знайомим нам законом інерції тіло рухається *зі сталою швидкістю*. Приблизно так рухається візок по горизонтальній поверхні стола, *якщо тертя між візком і столом дуже мале*.

Легко бачити, що під час такого руху **механічна енергія візка не змінюється**. Дійсно, його **потенціальна** енергія залишається незмінною, бо візок залишається на тій самій висоті, а **кінетична** — тому, що швидкість візка не змінюється.

Однак, хоч би яким малим було тертя, воно завжди є — і дія сили тертя приводить до того, що рух візка поступово сповільнюється. При цьому, звичайно, механічна енергія візка зменшується.

Розгляньмо ще кілька прикладів.

Під час падіння тіла його швидкість збільшується, а разом із нею збільшується й кінетична енергія тіла, що падає. Але при цьому одночасно зменшується висота тіла над поверхнею Землі, а разом із тим зменшується і його потенціальна енергія.

Розрахунок і досліди показують: *якщо опором повітря можна знехтувати*, сума кінетичної та потенціальної енергій тіла, що падає, залишається незмінною, тобто **механічна енергія тіла зберігається**.

Саме так відбувається під час **вільного падіння**, тобто падіння в безповітряному просторі, або під час уже знайомого вам падіння кулі та ядра.

Розглянуті приклади показують, що



механічна енергія зберігається, якщо можна знехтувати тертям, тобто коли на тіло діють лише сила тяжіння та сила пружності.

Це твердження називають **законом збереження механічної енергії**.

Зазначимо, що збереження механічної енергії не означає збереження кінетичної та потенціальної енергій **кожної окремо**: так, під час падіння тіла його потенціальна енергія перетворюється в кінетичну, а під час коливань маятника потенціальна та кінетична енергії багаторазово перетворюються одна в одну.

Ці взаємні перетворення енергії — із потенціальної в кінетичну і назад — дозволяють нам по-новому поглянути на роботу: **робота є мірою перетворення енергії з одного виду в інший**.

Наприклад, під час вільного падіння тіла робота сили тяжіння дорівнює зменшенню потенціальної енергії тіла і відповідно збільшенню його кінетичної енергії.

4. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Як ми бачили, коли є тертя, механічна енергія зменшується. Але чи зникає вона **безслідно**?

Ні: давно помічено, що внаслідок тертя тіла **нагріваються** (ще наші пращури добували вогонь тертям!). У 17–18 століттях декілька вчених висловили припущення, що під час нагрівання збільшується інтенсивність руху найдрібніших частинок, з яких складаються тіла. Звідси випливало, що рух не зникає внаслідок тертя, а **змінює свою форму**: механічний рух тіла як цілого перетворюється на рух невидимих частинок. У 19-му столітті це припущення було доведено на досліді, а суму кінетичної енергії хаотичного (безладного) руху та потенціальної енергії взаємодії частинок, з яких складається тіло, назвали **внутрішньою енергією**. Про внутрішню енергію ми розповімо в наступному розділі.

У 40-х роках 19-го століття троє вчених — німецькі вчені Роберт Майєр і Герман Гельмгольц та англійський учений Джеймс Джоуль — незалежно один від одного ви-

словили припущення, що енергія *завжди* зберігається, тобто сформулювали

закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, а лише змінює свою форму й переходить від одного тіла до іншого.



Про те, як було відкрито цей закон, ми розповімо в розділі «Хочеш дізнатися більше?».

Закон збереження енергії багаторазово перевіряли на найрізноманітніших дослідах, і він завжди витримував цю перевірку! Можна сказати без перебільшення, що цей закон — один із найважливіших законів природи, тому що він *пов'язує воєдино всі явища природи!*

Хочеш дізнатися більше?



ЯК БУЛО ВІДКРИТО ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ?

У 1840 році судно, на якому служив молодий лікар Роберт Майєр, стало на якір біля берегів тропічного острова Ява. Одному з матросів від спеки стало погано, і Майєр, прагнучи йому допомогти, розтинає хворому вену. Цим він хотів зменшити кров'яний тиск (тоді такий прийом був поширений). Із жахом лікар виявляє, що замість темної крові потекла яскраво-червона!

Майєр злякався тому, що добре знав: **яскраво-червона** кров тече в **артеріях** — судинах, по яких кров рухається **від** серця. Своїм яскравим кольором вона зобов'язана високому вмісту кисню: це «свіжа» кров, яка щойно омила легені. У венах же — судинах, по яких рухається кров **до** серця після того, як вона рознесла кисень по всьому тілу, кров **темна**, тому що в ній кисню залишилося мало. Для кровопускання розтинають лише вену, тому що кровотеча з артерії смертельно небезпечна!

На щастя, Майєр не помилився: він розітнув хворому саме вену. Але чому тоді в ній яскраво-червона кров? Від місцевих лікарів Майєр довідується, що це не випадково: вони кажуть, що тут, у тропіках, венозна кров у людей така ж яскраво-червона, як і артеріальна.

«Чим же це пояснити? — замислюється Майєр. — Може, справа в тому, що температура повітря тут майже дорівнює температурі людського тіла... Організму не потрібно витрачати енергію¹ на

¹ Цитуючи Майєра, ми використовуємо сучасну термінологію: сам Майєр енергію ще називав силою!

підтримання температури тіла, тому кисень залишається в крові — адже енергію дає саме згоряння за участі кисню. Але це означає, що енергія **зберігається**: вона тільки перетворюється з одного виду в інший, але ніколи не зникає і не з'являється з нічого».

Розвиваючи свою ідею, Майєр розглянув усі відомі йому перетворення енергії: кінетичної в потенціальну й навпаки, механічної — у внутрішню і внутрішньої — у механічну, розглянув електричну та хімічну енергії.

Через кілька років після виходу друком праці Майєра (але незалежно від нього) закон збереження енергії сформулювали англійський фізик Джеймс Джоуль і німецький учений Герман Гельмгольц, який прославився в молодості як лікар (як раз тоді він і сформулював закон збереження енергії!), а завершив наукову кар'єру директором фізичного інституту. Саме Гельмгольцу й належить точне формулювання закону збереження енергії.

Чому ж закон збереження енергії першим відкрив **лікар** — Роберт Майєр? Та й Гельмгольц працював лікарем, коли сформулював цей закон. Річ у тім, що для відкриття **загального** закону збереження енергії, який пов'язує воєдино **всі** явища природи, потрібен був **широкий погляд на всі явища — як живої, так і неживої природи**. Майєр якраз і шукав те спільне, що поєднує живу й неживу природу. І відкритий Майєром, Джоулем і Гельмгольцем великий закон збереження енергії дійсно пов'язав воєдино **всі** явища природи. Тому він став добрим другом і помічником не тільки фізиків, але й хіміків, біологів, медиків — усіх учених, які вивчають природу.



Запитання та завдання для самоперевірки¹

1. Наведіть приклади тіл, які здатні виконати роботу під час переходу з одного стану в інший.
2. Яку фізичну величину називають енергією? Чому одиниця енергії збігається з одиницею роботи?
3. Що таке механічна енергія? Які ви знаєте види механічної енергії?
4. Чому дорівнює кінетична енергія тіла? Коли вона змінюється?
5. Що таке потенціальна енергія? Чому дорівнює потенціальна енергія піднятого вантажу?

¹ Для спрощення розрахунків уважайте, що $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.

6. Які перетворення енергії відбуваються під час руху каменя, кинутого вгору?
7. Пліт пливе за течією ріки. Чи змінюється кінетична енергія плоту? Потенціальна?
8. За якої умови зберігається механічна енергія?
9. Які перетворення енергії відбуваються за наявності тертя?
10. Хлопчик на санях спускається з гірки висотою 20 м. Чому дорівнювала б швидкість саней наприкінці спуску, якби механічна енергія під час спуску зберігалася?

Apago PDF Enhancer

1. «Золоте правило» механіки та закон збереження енергії
2. Коефіцієнт корисної дії
3. Потужність

1. «ЗОЛОТЕ ПРАВИЛО» МЕХАНІКИ ТА ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Ви вже ознайомилися з *простими механізмами* — важелем, нерухомим і рухомим блоками, похилою площиною, гідравлічним пресом.

Нагадаємо, що внаслідок їх використання можна дістати виграш у силі — але він неодмінно супроводжується програшем у переміщенні. Можна й навпаки, дістати виграш у переміщенні — але тоді ми неодмінно програємо в силі. Архімед установив на досліді, що

завдяки використанню простих механізмів ми або програємо в силі у стільки разів, у скільки програємо в переміщенні, або виграємо в переміщенні у стільки разів, у скільки разів програємо в силі.

Це твердження назвали *«золотим правилом» механіки*. Найчіткіше його сформулював Галілей, уточнивши, що воно справедливе, *коли тертям можна знехтувати*.

Наприклад, ставши на довге плече важеля, людина може підняти коротким його плечем вантаж, вага якого у стільки разів більша за вагу цієї людини, у скільки разів довге плече важеля довше короткого.

Після відкриття закону збереження енергії стало ясно, що *«золоте правило» механіки є одним із проявів закону збереження енергії*.

унаслідок використання будь-якого простого механізму не можна дістати виграш у роботі.

Дійсно, якби, використовуючи простий механізм, можна було дістати виграш у роботі, цю «додаткову» роботу

можна було б використати для **збільшення** енергії якогось іншого тіла — наприклад, для підняття вантажу. У результаті сума енергій простого механізму та вантажу **збільшилася** б — але ж це суперечить закону збереження енергії!

Отже, із закону збереження енергії випливає, що жодний простий механізм не може бути **двигуном**, оскільки основне завдання двигуна, як ми вже знаємо, — **виконувати роботу**.

Із закону збереження енергії випливає й набагато загальніше твердження стосовно **будь-яких** механізмів — не тільки простих, а й будь-яких: **неможливе існування так званого «вічного двигуна»**, призначенням якого було б вічно **виконувати роботу, не витрачаючи енергії**.

Нині це відомо школярам, які знають про закон збереження енергії. Але так було не завжди: історія зберегла багато проектів вічних двигунів, які розповідають про дивовижну винахідливість їхніх творців.

Розгляд деяких з цих проектів для нас цікавий і повчальний. Ми присвяtimo йому наступний параграф.

2. КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ

Як ми вже знаємо, **виграти** в роботі, використовуючи механізм, не можна — це «забороняє» закон збереження енергії. Але **програшу** в роботі позбутися не вдасться, тобто в разі використання будь-яких механізмів **корисна робота завжди менша від виконаної**. І причина цього — усе той же закон збереження енергії. Чому?

По-перше, під час дії механізму неможливо повністю усунути **тертя** ковзання або кочення. А внаслідок такого тертя, як ми вже знаємо, механічна енергія завжди **зменшується**, перетворюючись на внутрішню: тіла нагріваються.

По-друге, самі механізми або їхні частини мають певну **масу**, тому під час їх піднімання доводиться виконувати «додаткову» роботу, яка стає ще одним «програшем у роботі».

Для визначення ефективності механізму треба знати, яку частину виконаної роботи становить корисна робота. З цією метою вводять **коефіцієнт корисної дії** (скорочено **ККД**). Позначають ККД грецькою літерою η (вимовляють «ета»).



Коефіцієнт корисної дії η дорівнює відношенню корисної роботи $A_{\text{кор}}$ до виконаної $A_{\text{вик}}$: $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}}$.

Коефіцієнт корисної дії часто виражають у відсотках — наприклад, $\eta = 0,7$ можна записати у вигляді $\eta = 70 \%$.

Розгляньмо, як знаходити ККД механізму, на прикладах.



За допомогою важеля підняли вантаж масою 100 кг на 1 м. При цьому сила, прикладена до другого плеча важеля, виконала роботу 1500 Дж. Чому дорівнює ККД важеля?

Корисна робота $A_{\text{кор}} = mgh$, де m — маса вантажу, h — висота, на яку підняли вантаж. Отже, $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}} = \frac{mgh}{A_{\text{вик}}}$.

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:

$$\eta = \frac{100 \cdot 9,8 \cdot 1}{1500} \approx 0,65. \text{ Отже, у цьому разі ККД становить } 65 \%.$$

За допомогою нерухомого блока піднімають вантаж масою 50 кг, прикладаючи силу 600 Н. Чому дорівнює ККД блока?

Коли використовують нерухомий блок, переміщення вантажу дорівнює переміщенню точки прикладання сили. Припустимо, що вантаж піднято на висоту h . Тоді корисна робота $A_{\text{кор}} = mgh$, де m — маса вантажу. Виконана ж робота $A_{\text{вик}} = Fh$, де F — прикладена сила.

$$\text{Отже, } \eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}} = \frac{mgh}{Fh} = \frac{mg}{F}. \text{ Перевіривши одиниці величин і}$$

$$\text{підставивши числові дані, маємо: } \eta = \frac{50 \cdot 9,8}{600} \approx 0,82. \text{ Отже,}$$

у цьому разі ККД становить 82 %.

За допомогою рухомого блока піднімають вантаж масою 120 кг. Чому дорівнює ККД блока, якщо маса самого блока дорівнює 20 кг? Будемо вважати, що тертям можна знехтувати.

Під час використання рухомого блока переміщення точки прикладання сили вдвічі більше за переміщення ванта-

жу. Припустимо, що вантаж піднято на висоту h . Тоді точка прикладання сили перемістилася на $2h$. Корисна робота $A_{\text{кор}} = mgh$, де m — маса вантажу.

Разом із вантажем піднімають і рухомий блок, тому прикладена сила вдвічі менша за **вагу вантажу разом із блоком**, тобто

$F = \frac{m + m_6}{2} g$, де m_6 — маса блока. Звідси виконана робота

$$A_{\text{вик}} = A \cdot 2h = \frac{m + m_6}{2} g \cdot 2h = (m + m_6) gh.$$

Отже, $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}} = \frac{mgh}{(m + m_6) gh} = \frac{m}{m + m_6}$. Перевіряючи одиниці вели-

чин і підставивши числові дані, отримаємо: $\eta = \frac{120}{120 + 20} \approx 0,86$.

Отже, у цьому разі ККД становить 86 %.

По похилій площині піднімають вантаж масою 60 кг, прикладаючи до нього силу 250 Н, напрямлену вздовж площини. Яким є ККД площини, якщо її довжина дорівнює 10 м, а висота дорівнює 3 м?

Корисна робота $A_{\text{кор}} = mgh$, де m — маса вантажу, h — висота похилої площини. Виконана ж робота $A_{\text{вик}} = Fl$, де F — прикладена сила, l — довжина похилої площини. Отже,

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}} = \frac{mgh}{Fl}.$$

Перевіряючи одиниці величин і підставивши числові дані, маємо:

$$\eta = \frac{60 \cdot 9,8 \cdot 3}{250 \cdot 10} \approx 0,71. \text{ Отже, у цьому разі ККД становить 71 \%}$$

3. ПОТУЖНІСТЬ

Для характеристики двигуна важливою є «швидкість» виконання роботи — **потужність**.

Наприклад, підіймальний кран піднімає кілька сотень цеглин на висоту багатоповерхового будинку за лічені секунди. А людині для цього знадобилось би кілька днів. Отже, потужність підіймального крана в багато разів більша за потужність людини.



Потужністю P називають відношення виконаної роботи A до проміжку часу t , за який виконано цю роботу: $P = \frac{A}{t}$.

Одиниця потужності — **джоуль за секунду**, або **ват** (Вт). Її названо на честь англійського винахідника Джеймса Ватта. Потужність дорівнює 1 Вт, якщо роботу в 1 Дж виконують за 1 с, тобто $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Як одиниці потужності використовують також кіловат (1 кВт = 10^3 Вт) і мегават (1 МВт = Вт).

Щоб дістати «відчутне» уявлення про одиницю потужності, розв'яжемо таку задачу.



Яку потужність розвиває школяр масою 50 кг, добігаючи з 1-го поверху на 5-й за півхвилини? Будемо вважати, що висота поверху дорівнює 3 м.

Виконувана школярем робота $A = mgh$, де m — маса школяра, h — висота, на яку він піднявся (у цьому разі він піднявся на 4 поверхи, тобто на 12 м). Отже, $P = \frac{A}{t} = \frac{mgh}{t}$, де t — час піднімання (підставляючи числові дані, його треба виразити в секундах). Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, маємо: $A = \frac{50 \cdot 9,8 \cdot 12}{30} \approx 200$ (Вт).

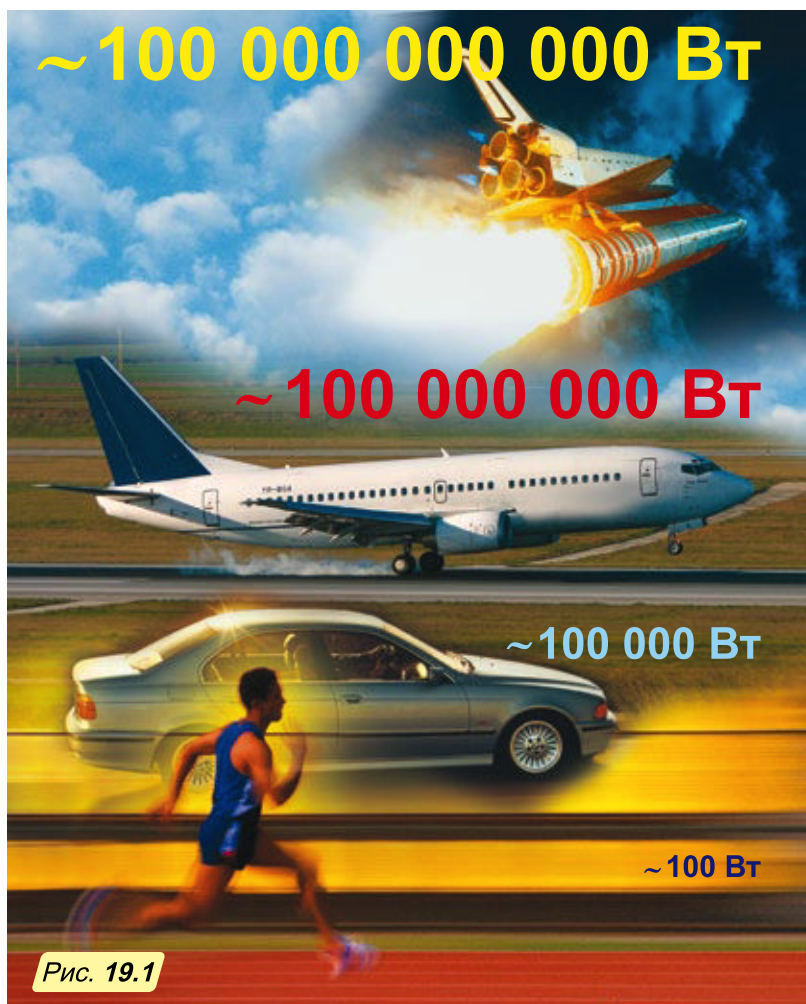
Коли людина йде, вона розвиває потужність близько 60 Вт.

Потужність створених людиною двигунів у тисячі, мільйони й навіть мільярди разів перевищує потужність самої людини (рис. 19.1).

Наприклад, потужність легкового автомобіля може становити 100 кВт, а великого пасажирського авіалайнера — 100 МВт.

Найбільшу ж потужність розвивають сьогодні двигуни космічних ракет — вона сягає сотень тисяч мегават.

Ці чудові двигуни людина змогла створити завдяки «потужності» свого розуму, який не можна виміряти ватами чи навіть мегаватами.



Потужність іноді виражають через силу та швидкість. Оскільки $P = \frac{A}{t}$, а $A = Fs$, маємо: $P = \frac{Fs}{t} = F \frac{s}{t} = Fv$, тобто **потужність дорівнює добутку сили на швидкість**.

Це пояснює, чому водій перемикає на малу швидкість, коли автомобіль рухається вгору схилом: щоб збільшити силу тяги за тієї самої **потужності** двигуна, необхідно зменшити **швидкість** руху.



Запитання та завдання для самоперевірки¹

1. Сформулюйте «золоте правило» механіки. За якої умови воно справедливе?
2. Поясніть на прикладі дії важеля, чому «золоте правило» механіки є наслідком закону збереження енергії.
3. Чи може який-небудь простий механізм (важіль, блок, похила площина) бути двигуном? Обґрунтуйте вашу відповідь.
4. Що таке коефіцієнт корисної дії? Чи може він бути більшим за 100 %? Обґрунтуйте вашу відповідь.
5. За допомогою важеля підняли вантаж масою 50 кг на 0,4 м. Яку роботу виконала сила, прикладена до другого плеча важеля, якщо ККД важеля дорівнює 75 %?
6. За допомогою нерухомого блока піднімають вантаж масою 120 кг. Яку при цьому прикладають силу, якщо ККД блока дорівнює 0,8?
7. За допомогою рухомого блока піднімають вантаж масою 200 кг, прикладаючи силу 1200 Н. Чому дорівнює ККД блока?
8. Автомобіль їде зі сталою швидкістю $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. При цьому двигун розвиває потужність 100 кВт. Якою є сила тяги автомобіля?

Apago PDF Enhancer

¹ Для спрощення розрахунків уважайте, що $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.

1. Чому спроби побудувати вічний двигун були такими впертими?
2. Загадки й розгадки «вічних двигунів»
3. Користь від пошуку вічних двигунів усе-таки була!

1. ЧОМУ СПРОБИ ПОБУДУВАТИ ВІЧНИЙ ДВИГУН БУЛИ ТАКИМИ ВПЕРТИМИ?

Чи варто всякого, хто в попередні століття намагався побудувати вічний двигун, уважати неграмотним або божевільним? Навряд: адже рух багатьох тіл, які люди бачили навколо себе, здавався їм вічним! По небу вічно рухаються Сонце, Місяць і планети, вічно обертається навколо своєї осі Земля... Вічно течуть річки, і вічно біжать гнані вітром хмари... Люди навіть навчилися використовувати рух води та вітру, побудувавши водяні та вітряні млини.

Тому не дивно, що умами вчених та інженерів заволоділа зухвала думка: якщо вічний рух *існує* в природі, то, може, і людина здатна створити вічний двигун і примусити його служити собі? Роздуми про створення вічного двигуна не давали спокою багатьом — навіть знаменитому італійському художнику та винахіднику Леонардо да Вінчі.

З розвитком виробництва потреба в двигунах ставала все більшою, а теплових двигунів іще не було. Після того ж, як їх винайшли, вони тривалий час були занадто дорогими. Знаменита картина Іллі Репіна (рис. 20.1), що народився в Україні, наочно показує, як важко було обходитися без двигунів!

Винахідника вічного двигуна очікувала б вічна слава, до того ж здавалося, що велике відкриття само йде в руки. Наприклад, розкрутивши важке колесо, посаджене на добре змащену вісь, можна було спостерігати, що колесо обертається само собою *дуже довго*. Здавалося, варто прикласти трохи кмітливості й технічної майстерності, змінивши конструкцію колеса так, щоб одна його половина

завжди переважувала другу, — і *«дуже довго»* перетвориться на *«вічно»*. Більше того: таке «вічне колесо» буде не лише обертатися само собою, але й зможе рухати млин або верстат, тобто стане *вічним двигуном!*



Рис. 20.1

Однак багатоміліонні спроби створити вічний двигун завжди завершувалися невдачею. Учені й інженери довго не помічали принципової відмінності між *вічним рухом* і *вічним двигуном*.

У чому ж полягає ця відмінність?

Вічний рух *можливий*, якщо повністю усунути тертя, — таким, наприклад, є *рух за інерцією*, коли на тіло не діють інші тіла: при цьому тіло рухається вічно зі сталою швидкістю. І колесо оберталося б вічно, якби можна було усунути тертя повністю.

Однак вічний *двигун*, тобто пристрій, який *виконував би роботу без споживання енергії*, неможливий навіть за *цілковитої відсутності* тертя. Нині ми знаємо, що це — наслідок закону збереження енергії. Але, як ми незабаром побачимо, цей великий закон зобов'язаний своїм відкриттям... саме невдачам винахідників вічних двигунів!

2. ЗАГАДКИ Й РОЗГАДКИ «ВІЧНИХ ДВИГУНІВ»

Найдавніший із відомих нині проектів вічного двигуна належить індійському поету, математику й астроному Бхаскарі, який жив у 12-му столітті. Ось цей проект.



На колесі (рис. 20.2) закріплено довгі закриті посудини, наполовину наповнені ртуттю. Посудини розташовані *під кутом* до радіуса колеса, тому за *будь-якого* положення колеса в його лівій частині міститься *більше* ртуті, ніж у правій. Отже, за задумом «винахідника», колесо має обертатися *проти* годинникової стрілки. У чому помилка проекту?

У правій частині колеса ртуті дійсно менше, ніж у лівій, але ця ртуть міститься *далі* від осі. Розрахунок показує, що **моменти сил**, з якими діє на колесо ртуть у лівій і правій частинах колеса, *точно врівноважують* один одного. І тому внаслідок правила моментів колесо *перебуватиме в рівновазі*.

Приваблива ідея побудувати колесо, яке не може перебувати в рівновазі й тому обертатиметься вічно, іде крізь століття, підкорюючи країну за країною. Винахідники «вічних коліс» використовували замість посудин зі ртуттю важелі, що відкидаються, або кулі, що перекочуються. Таким, наприклад, був один із проектів Леонардо да Вінчі (рис. 20.3). Як і всі інші, цей «вічний двигун» не працював, але був, мабуть, красивішим за інші — адже його творцем був не тільки великий винахідник, а й великий художник. Розгляньмо цей проект пильніше.



Леонардо припускав, що винайдене ним колесо з кульками, які котяться по зігнутих спицях, буде обертатися вічно (на рисунку — за годинниковою стрілкою), оскільки кульки, розташовані далі від осі обертання колеса, мають *неодмінно переважувати* кульки, розташовані ближче до осі. У чому помилка проекту?

Якщо підрахувати, скільки кульок розташовано з кожного боку колеса, то виявиться, що ліворуч кульок *більше*! Розрахунок показує, що **моменти сил**, які обертають колесо в протилежні боки, точно дорівнюють один одному.

Як ми бачимо, пізніші винахідники «вічних коліс» навдили докази, *протилежні* доказам перших винахідників, — тепер вони віддавали перевагу не *силі*, а *плечу сили*, але ще не вміли правильно знаходити **моменти сил**. Першим правильний розрахунок моментів сил зробив саме Леонардо, про що розповімо нижче.



Рис. 20.2



Рис. 20.3

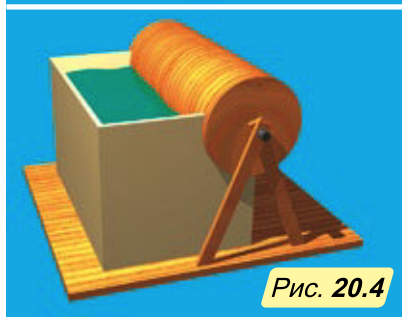


Рис. 20.4



Рис. 20.5

Винахідники вічних двигунів намагалися використати й властивості рідин. Ось два таких проекти.



Дерев'яний барабан, який обертається на осі, частково занурено у воду (рис. 20. 4). За задумом авторів «винаходу», на занурену у воду частину барабана згідно із законом Архімеда діє виштовхувальна сила, напрямлена *вгору*. Тому барабан мусить обертатися за годинниковою стрілкою. У чому ж помилка проекту?

Сили тиску води на ділянки поверхні напрямлені **перпендикулярно** до поверхні барабана, тобто напрямлені до осі барабана. Тому ці сили **не обертають** барабан, а тільки намагаються викривити вісь, на яку його посаджено.

За задумом автора проекту, зображеного на рис. 20.5, вода в широкій частині посудини завжди переважуватиме воду у вузькій її частині. У результаті вода витискає саму себе у вузьку частину посудини, з якої вона виливається в ту ж саму посудину. Унаслідок цього виникає безперервна циркуляція води. У чому помилка проекту?

Автор проекту забув про закон сполучених посудин.

3. КОРИСТЬ ВІД ПОШУКУ ВІЧНИХ ДВИГУНІВ УСЕ-ТАКИ БУЛА!

Чи насправді всі спроби побудувати вічний двигун були *марними*?

Ні! Невдачі під час створення вічних двигунів змушували вчених по-новому поглянути на проблему, що й привело нарешті до відкриття одного з найважливіших законів природи — *закону збереження енергії*.

Так, великий італієць Леонардо да Вінчі, який присвятив винайденню вічного двигуна багато років, з кожним новим проектом щодалі краще осягав проблему. Зазнавши невдачі з побудовою «вічного колеса» (про цей його проект ми розповіли вище), він уперше здійснив точний розрахунок моментів сил для «вічного колеса». Ось його висновок: «Сумарний момент сил, які обертають колесо в один бік, точно дорівнює сумарному моменту сил, які обертають колесо в другий бік. Тому існування «вічного колеса» неможливе».

Це — перший науково обґрунтований висновок щодо неможливості вічного двигуна.

Наприкінці 16-го століття нідерландський інженер і математик Сімон Стевін пропонує розглянути ланцюжок з однакових куль на двох похилих площинах (рис. 20.6).

Може здатися, що дві кулі на правій площині не можуть урівноважити чотири кулі на лівій площині, і тому ланцюжок мусить вічно обертатися (проти годинникової стрілки).

Але *дослід* свідчить, що ланцюжок перебуває в рівновазі! І тоді, виходячи з *неможливості* вічного двигуна, Стевін *знаходить* умови рівноваги тіл на похилій площині.

Однак головний висновок із неможливості створення вічного двигуна зробив уже відомий вам Роберт Майєр. Він намагався побудувати вічний двигун, коли йому було всього десять років! Його спіткала невдача — так само, як

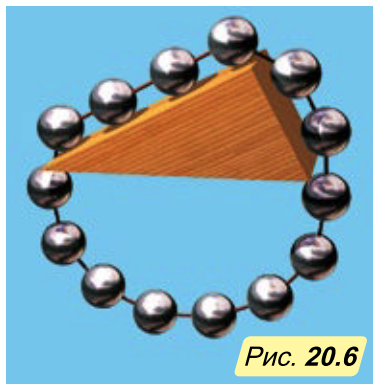


Рис. 20.6

і всіх інших «винахідників». Але на відміну від них Майєр понад десять років розмірковував над причинами невдачі. За його власним зізнанням, саме ці роздуми й привели його нарешті до відкриття закону збереження енергії.

Герман Гельмгольц, співавтор відкриття цього закону, також говорив, що на думку про збереження енергії його наштотували безуспішні спроби створити вічний двигун.

З появою парових машин активність винахідників вічних двигунів зменшилась, оскільки здавалося, що парові машини здійснили віковичну мрію людства про дешеві й потужні двигуни. Про теплові двигуни та пов'язані з ними проблеми ми розповімо в наступному розділі.



Запитання та завдання для самоперевірки

1. За задумом автора проекту, зображеного на рис. 20.7, колесо обератиметься вічно, оскільки чотири молоточки завжди переважуватимуть три такі самі молоточки. У чому помилка проекту?
2. Здається, що права, довша частина ланцюга (див. рис. 20.8) має постійно переважувати ліву, коротшу частину. Унаслідок цього ланцюг нібито вічно обертатиме колеса, рухаючи якийсь механізм. У чому помилка проекту?

Рис. 20.7



Рис. 20.8



- Якщо напрям сили \vec{F} збігається з напрямом переміщення \vec{s} точки прикладання сили, механічна робота A дорівнює добутку модуля сили на модуль переміщення: $A = Fs$.
- Якщо напрям сили \vec{F} протилежний напрямку переміщення \vec{s} точки прикладання сили, робота A цієї сили від'ємна й дорівнює добутку модуля сили на модуль переміщення зі знаком «мінус»: $A = -Fs$.
- Механічна робота дорівнює нулю, якщо переміщення тіла дорівнює нулю або сила, яка діє на тіло, напрямлена перпендикулярно до переміщення.
- Коли тіло рухається вниз, робота сили тяжіння додатна, а коли вгору — від'ємна.
- У разі зменшення деформації сила пружності пружини виконує позитивну роботу, а в разі збільшення деформації — від'ємну.
- Робота сили тертя ковзання або кочення від'ємна.
- Енергією називають фізичну величину, що характеризує здатність тіла або системи тіл виконати роботу.
- Потенціальною енергією тіла називають частину механічної енергії, яку визначає взаємодія цього тіла з іншими тілами (або взаємодія частин тіла).
- Кінетичною енергією тіла називають частину механічної енергії, яку визначає рух тіла. Кінетична енергія $E_k = \frac{mv^2}{2}$, де m — маса тіла, v — модуль швидкості тіла.
- Потенціальна енергія піднятого вантажу $E_n = mgh$, де m — маса вантажу, h — висота, на якій перебуває вантаж.
- Закон збереження механічної енергії: якщо можна знехтувати тертям, тобто коли на тіло діють лише сила тяжіння та сила пружності, механічна енергія зберігається.
- Закон збереження енергії: енергія не виникає й не зникає, а тільки змінює свою форму й переходить від одного тіла до іншого.

- «Золоте правило» механіки: завдяки використанню простих механізмів ми або виграємо в силі у стільки разів, у скільки програємо в переміщенні, або виграємо в переміщенні у стільки разів, у скільки разів програємо в силі.
- Унаслідок використання будь-якого простого механізму не можна одержати виграш у роботі.
- Коефіцієнт корисної дії η дорівнює відношенню корисної роботи $A_{\text{кор}}$ до виконаної $A_{\text{вик}}$: $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{вик}}}$.
- Потужністю P називають відношення виконаної роботи A до проміжку часу t , за який виконано цю роботу: $P = \frac{A}{t}$.

Apago PDF Enhancer

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

РОЗДІЛ

4

КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

§ 21. Внутрішня енергія

§ 22. Теплообмін

§ 23. Теплова рівновага.
Вимірювання температури

§ 24. Питома теплоємність

§ 25. Енергія палива

§ 26. Плавлення та кристалізація

§ 27. Пароутворення та конденсація

§ 28. Теплові двигуни



1. Перетворення енергії внаслідок нагрівання тертям
2. Перетворення енергії внаслідок стискання та розширення газу

1. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВНАСЛІДОК НАГРІВАННЯ ТЕРТЯМ

Ви вже знаєте, що тіла мають механічну енергію: кінетична енергія зумовлена рухом тіл, а потенціальна — їх взаємодією. Та чи вичерпується *вся* енергія тіл тільки їх механічною енергією?



Проведемо дослід

Штовхнемо брусок, який лежить на горизонтальній поверхні стола, — він ковзатиме й зупиниться. Його кінетична енергія зникла. Але чи сталося це «зникнення енергії» безслідно?

Потріть один брусок об другий — вони *нагріються*. Нагрівання тіл унаслідок тертя помітили наші далекі пращури — адже вони тертям добували вогонь! На рис. 21.1 показано пристрої, що допомагають добути вогонь тертям, на рис. 21.2 зображено момент «загоряння» внаслідок тертя, а на рис. 21.3 — добутий тертям вогонь.

Декілька століть тому вчені здогадалися, що під час тертя рух не зникає, а передається частинкам, з яких складаються тіла, а нагрівання тіл — ознака того, що інтенсивність цього «внутрішнього руху» збільшилась. Ясніше за інших висловив цю думку в першій половині 19-го століття французький учений Саді Карно, який побудував теорію теплових явищ. Він писав¹: «Теплота — це механічна енергія, що змінила свою форму: це енергія руху частинок тіла. Коли зникає механічна енергія, виникає одночасно теплота в кількості, що точно дорівнює зниклій механічній енергії».

¹ Цитуючи Карно, ми змінили вжиту ним термінологію на сучасну.

І навпаки, коли зникає теплота, виникає механічна енергія. Отже, енергія ніколи не виникає і ніколи не зникає, а тільки змінює свою форму».

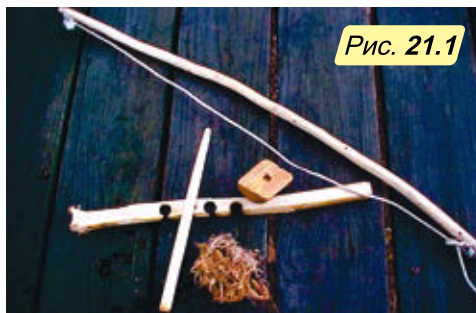


Рис. 21.1



Рис. 21.2



Рис. 21.3

Чи можна перевірити на досліді, що під час нагрівання швидкість руху частинок речовини збільшується?

Нагадаємо, що на початку 19-го століття англійський ботанік Роберт Броун виявив, що частинки квіткового пилку рослин, змулені у воді, безперервно хаотично рухаються.

Як установили потім учені, цей «броунівський рух» зумовлений ударами молекул води по частинках пилку. Досліди показали, що під час нагрівання інтенсивність броунівського руху збільшується. А це означає, що

під час нагрівання швидкість хаотичного руху молекул збільшується.



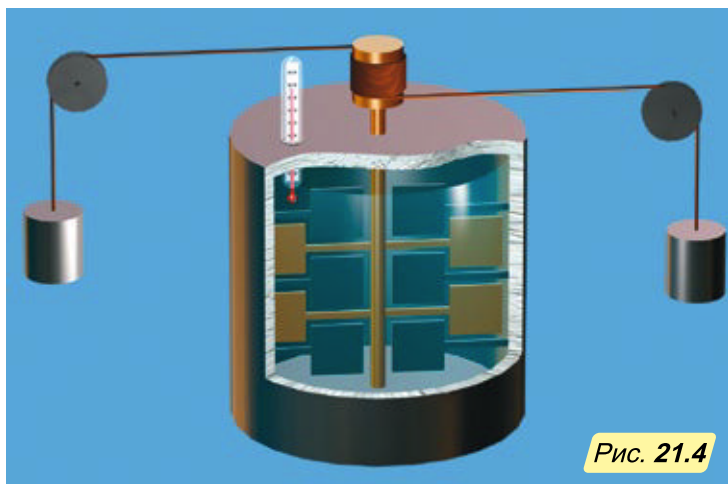
Отже, під час нагрівання внаслідок тертя механічна енергія тіл частково перетворюється на кінетичну енергію хаотичного руху частинок цих тіл. Але не тільки на кінетичну!

Ви вже знаєте, що в рідинах і твердих тілах молекули **взаємодіють** одна з одною, тобто мають не лише кінетичну, а й потенціальну енергію. Досліди та розрахунки показують, що під час нагрівання рідин і твердих тіл збільшується як кінетична енергія хаотичного руху молекул, так і потенціальна енергія їхньої взаємодії.



Суму кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії частинок, з яких складається тіло, називають внутрішньою енергією. Під час нагрівання тіл їхня внутрішня енергія збільшується.

У першій половині 19-го століття англійський учений Джеймс Прескотт Джоуль вимінив на досліді, яку роботу треба виконати, щоб нагріти 1 кг води на 1 °С. Одержаний результат здивував багатьох.



На рис. 21.4 показано схему досліді Джоуля. Вантаж, який опускався, обертав лопаті, занурені у відерце з водою. Обертання води в цьому відерці заважали перегородки, крізь які лопаті проходили з невеликим зазором. Унаслідок тертя шарів води один об один, об лопаті та об перегородки вода нагрівалась. Отже, під час опускання вантажу його потенціальна енергія зменшувалася, перетворюючись у внутрішню енергію води.

Знаючи роботу, виконану силою тяжіння під час опускання вантажу, Джоуль установив на досліді, що для нагрівання 1 кг води на 1°C треба виконати роботу, яка дорівнює 4200 Дж. Щоб уявити, великою чи малою є ця робота за «нашими мірками», розглянемо задачу.

?

На який поверх підніметься школяр масою 47 кг, виконавши під час підйому роботу 4200 Дж? Будемо вважати, що

$g = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$, а висота одного поверху дорівнює 3 м.

Щоб підняти тіло масою m на висоту h , треба виконати роботу

$A = mgh$, звідки $h = \frac{A}{mg}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $h = \frac{4200}{47 \cdot 10} \approx 9$ (м). Отже, нашого

школяра можна підняти на три поверхи, тобто з першого поверху на **четвертий**! Ось яку енергію треба надати 1 л води для нагрівання всього на один градус!

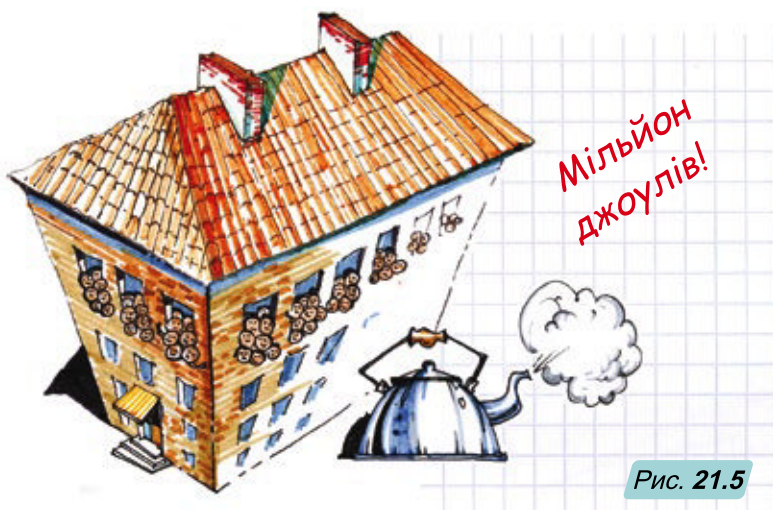
«Масштаби» зміни внутрішньої енергії під час «звичайних» теплових явищ, які ми спостерігаємо щодня, можна уявити за допомогою такої задачі.

?

Яку енергію треба передати воді в повному трилітровому чайнику, щоб нагріти її від кімнатної температури (20°C) до температури кипіння (100°C)? Скільки повних відер води можна було б підняти на 1 м, виконавши роботу, що чисельно дорівнює цій енергії? Скільки школярів можна було б підняти на 4-й поверх? Будемо вважати, що середня маса школяра дорівнює 47 кг.

Ми вже знаємо, що для нагрівання 1 кг води на 1°C треба витратити енергію 4200 Дж. Щоб нагріти 3 л (3 кг) води на 80°C , треба витратити в $3 \cdot 80 = 240$ разів більше енергії, тобто $4200 \cdot 240 \approx 10^6$ (Дж). Як уявити собі **мільйон** джоулів? Неважко підрахувати, використовуючи формулу $A = mgh$, що, піднімаючи повне відро масою 10 кг на 1 м, ви виконуєте роботу, яка дорівнює приблизно 100 Дж. Отже, щоб виконати роботу, яка дорівнює мільйону джоулів, треба підняти на 1 м **десять тисяч повних відер води**: ними можна було б наповнити дві залізничні цистерни! Повертаючись до школярів, дістаємо, що

цієї енергії вистачило б для того, щоб підняти на 4-й поверх **240 школярів**, тобто 8 класів (рис. 21.5)!



Під час остигання чайника до кімнатної температури внутрішня енергія води в ньому зменшується на стільки ж — тобто на мільйон джоулів, хоча ми цього практично не помічаємо.

Ще більша зміна внутрішньої енергії тіла відбувається під час **змінення агрегатного стану речовини** — скажімо, унаслідок перетворення рідини на пару: щоб «розтягти» молекули рідини, які притягуються, необхідно виконати роботу, тобто збільшити потенціальну енергію взаємодії молекул.

Наприклад, для повного «википання» трилітрового чайника води треба витратити приблизно в 7 разів більше енергії, ніж для нагрівання води в чайнику від кімнатної температури до температури кипіння!

Спробуйте оцінити самі, на який поверх можна було б підняти всіх учнів вашої школи разом з учителями, витративши таку енергію.

Ще більше змінюється внутрішня енергія внаслідок **хімічних реакцій**, коли відбувається **перетворення одних ре-**

човин в інші. При цьому змінюється потенціальна енергія взаємодії **атомів**.

Яскравий (у буквальному значенні слова) приклад хімічної реакції — **горіння**. Так, під час горіння вугілля атоми Карбону, з яких складається вугілля, сполучаються з атомами Оксигену, що входять до складу повітря. У результаті утворюється вуглекислий газ.

Унаслідок «перебудови» молекул, яка відбувається під час горіння, потенціальна енергія взаємодії атомів зменшується, частково перетворюючись в кінетичну енергію хаотичного руху молекул. У результаті температура значно підвищується. У такому разі кажуть про «виділення енергії» під час згоряння палива.

Докладніше ми розглянемо це в § 25. *Енергія палива*, а зараз зазначимо тільки, що внаслідок згоряння 1 л бензину виділяється приблизно 30 мільйонів джоулів енергії. Отже, унаслідок згоряння 3 л бензину виділяється енергія, що чисельно дорівнює роботі, необхідній, щоб підняти на вже знайомий нам 4-й поверх вантаж масою 1000 т! Це приблизно дорівнює масі пасажирського поїзда (разом з пасажирами).

Діставши уявлення про величезні запаси внутрішньої енергії, що міститься в тілах, ми можемо поставити собі запитання: як перетворити хоча б частину внутрішньої енергії в механічну, щоб рухати верстати, автомобілі, поїзди тощо?

Чи можна, наприклад, «повернути назад» механічну енергію, затрачену на нагрівання тіл тертям? На жаль, ні: брусок, який зупинився внаслідок тертя, не почне рухатися, остигаючи до попередньої температури!

На щастя, змінити внутрішню енергію тіла, виконавши роботу, можна не тільки за допомогою тертя. Є також інший спосіб, який ми зараз розглянемо.

2. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВНАСЛІДОК СТИСКАННЯ ТА РОЗШИРЕННЯ ГАЗУ

Проведемо дослід

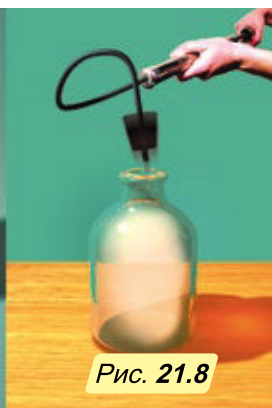


Спробуйте енергійно накачувати велосипедну камеру (рис. 21.6). Скоро ви відчуєте, що насос нагрівся. Головною

причиною нагрівання в цьому випадку є не тертя, а **стис-**
кання газу (повітря): стискаючи газ, ви виконуєте роботу,
збільшуючи внутрішню енергію газу.

Нагрівання газу внаслідок стискання може бути на-
стільки великим, що це може призвести до займання па-
лива. Наприклад, якщо помістити на дно товстостінного
прозорого циліндра суху ватку й різко вштовхнути поршень
у циліндр, то ватка спалахне (рис. 21.7). Нагрівання газу
внаслідок стискання використовують у дизельних двигу-
нах, установлених в автомобілях, тракторах, на кораблях.

Коли ми стискаємо газ, ми виконуємо роботу над га-
зом, унаслідок чого газ нагрівається. Виходячи з цього,
можна очікувати, що під час розширення газу, коли він
виконує роботу, його внутрішня енергія зменшується,
тобто температура газу знижується.



Проведемо дослід

Почнімо накачувати повітря в товстостінну скляну
посудину, щільно закриту корком. Через деякий час ко-
рок вискочить з досить великою швидкістю, а в посудині
з'явиться туман (рис. 21.8).

У нашому досліді *газ, розширюючись, виконав роботу, передавши коркові механічну енергію*. І при цьому внутріш-
ня енергія газу дійсно *зменшилася*: на це вказує поява
туману — водяна пара, що міститься в повітрі, унаслідок

охладження перетворюється на крапельки води — «випадає роса».

Робота, що її виконує газ під час розширення, і є той спосіб перетворення внутрішньої енергії в механічну, на якому ґрунтується дія теплових двигунів.

Наприклад, в автомобільному двигуні газ, розширюючись у циліндрі під поршнем, рухає поршень, а цей рух передається колесам автомобіля.

У парових турбінах, установлених на електростанціях, роботу також виконує газ, який розширюється: він штовхає лопаті турбіни. Дію теплових двигунів ми розглянемо в § 28. *Теплові двигуни.*

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Що таке внутрішня енергія?
2. У яких процесах змінюється внутрішня енергія тіла? Наведіть приклади таких процесів.
3. Якими способами можна змінити внутрішню енергію тіла, виконуючи роботу? Що спільного в цих способах і чим вони відрізняються?
4. Яке тіло може виконувати роботу за рахунок зменшення внутрішньої енергії? Проілюструйте свою відповідь прикладом.
5. Брусок ковзає по похилій площині зі сталою швидкістю. Як змінюються механічна та внутрішня енергія бруска?
6. Камінь падає з деякої висоти. Як змінюється його механічна енергія? внутрішня? Чи врахували ви, даючи відповіді на ці запитання, опір повітря?
7. Якщо відкоркувати пляшку з газованою водою, що має температуру навколишнього повітря, вода через деякий час стане прохолоднішою за повітря. Чим це пояснити?

§22 ТЕПЛООБМІН

1. Кількість теплоти
2. Види теплообміну

1. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ

Ви вже знаєте, що внутрішню енергію тіла можна збільшити, виконавши роботу — за допомогою тертя або стискання газу. А коли газ розширюється, він виконує роботу і його внутрішня енергія зменшується.

А чи можна змінити внутрішню енергію тіла так, щоб при цьому ні над тілом не здійснювалася робота, ні само тіло не виконувало роботи?

Можна: наприклад, коли налитий у чашку гарячий чай остигає, його внутрішня енергія зменшується. Але роботу при цьому не виконують.



Змінювання внутрішньої енергії тіла без виконання роботи називають теплообміном. Енергію, що її дістає або віддає тіло внаслідок теплообміну, називають кількістю теплоти.

Кількість теплоти позначають Q . Оскільки кількість теплоти — це енергія, її вимірюють у *джоулях*.

Теплообмін і є другим способом змінювати внутрішню енергію тіла. Отже,



внутрішню енергію тіла можна змінити двома способами: 1) виконавши роботу; 2) завдяки теплообміну.

Зазначимо, що роботу може виконувати й саме тіло — тоді його внутрішня енергія зменшується. Наприклад, газ, розширюючись, виконує роботу, а його внутрішня енергія зменшується — газ охолоджується.

Під час нагрівання та охолодження тіл суттєво змінюється внутрішня енергія. Наприклад, основна «витрата енергії» людиною зумовлена не її фізичною діяльністю, а теплообміном з навколишнім повітрям.



Чому в спекотну погоду апетит зменшується?

У спеку майже не відбувається теплообмін між тілом людини та повітрям, тому «витрата енергії» людиною значно зменшується.

2. ВИДИ ТЕПЛООБМІНУ

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

Проведемо дослід



Доторкніться до чашки з гарячим чаєм: руки нагріватимуться (рис. 22.1). Отже, *унаслідок теплообміну енергія переходить від більш нагрітого тіла до менш нагрітого*. Яким же є механізм цього передання енергії?



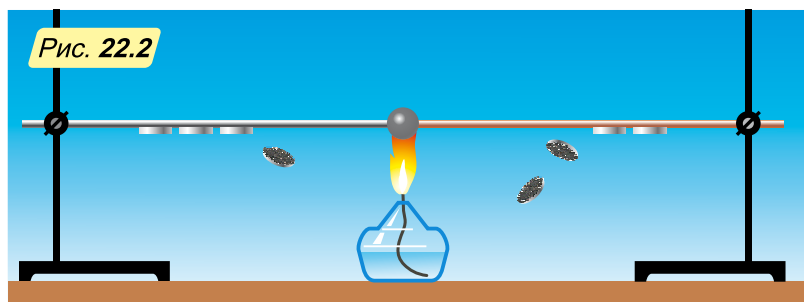
Коли тіла різної температури дотикаються, їхні молекули взаємодіють одна з одною. І молекули більш нагрітого тіла, що мають більшу кінетичну енергію, передають частину своєї кінетичної енергії молекулам менш нагрітого тіла. А чи може передаватися енергія між частинами *одного й того самого* тіла?

Проведемо дослід



Закріпимо в одному штативі кінець мідного стрижня, а в другому — кінець сталевого стрижня таких самих розмірів. До стрижнів прикріпимо знизу воском монетки й нагріватимемо вільні кінці стрижнів (рис. 22.2). Незабаром

віск почне плавитися й монетки почнуть відпадати від стрижнів, причому першими відпадуть монетки, розташовані ближче до нагрітого кінця стрижня. Отже, **уздовж стрижня передається енергія**: частинки з більшою кінетичною енергією передають енергію частинкам з меншою кінетичною енергією.



Вид теплообміну, зумовлений передаванням енергії від одного тіла до іншого або від одних частин тіла до інших у результаті теплового руху та взаємодії частинок, називають теплопровідністю.

Теплопровідністю називають не тільки вид теплообміну, але й фізичну величину, що характеризує здатність речовини «проводити тепло». Від мідного стрижня монетки відпадуть раніше, ніж від сталевого. Це означає, що мідь краще «проводить тепло», ніж сталь, тобто теплопровідність міді більша, ніж теплопровідність сталі.

Чи можна «на дотик» порівняти теплопровідність різних матеріалів?



Торкніться рукою стінки шафи, одєжі в шафі, книги, металевої дверної ручки. Чому одні предмети на дотик видаються теплими, а інші — прохолодними, хоча насправді всі вони мають однакову (кімнатну) температуру?

Якщо теплопровідність матеріалу мала, під час дотику руки тонкий поверхневий шар практично відразу нагріється до температури тіла, тому такий предмет на дотик видається теплим. Якщо ж теплопровідність матеріалу велика, «відведення тепла» відбувається настільки швидко, що поверхня предмета

зберігатиме температуру, яка близька до температури повітря. А оскільки вона нижча за температуру тіла, предмет на дотик видасться прохолодним.

Виміри показують, що велику теплопровідність мають метали, особливо срібло та мідь. Вода, цегла та скло «проводять тепло» в сотні разів гірше, ніж мідь, і в десятки разів гірше, ніж сталь. Теплопровідність деревини в декілька разів менша, ніж цегли. Дуже мала теплопровідність газів (наприклад, повітря).



Як пояснити малу теплопровідність пухнастих тканин, наприклад вовняних?

Між волокнами таких тканин багато повітря, а повітря має дуже малу теплопровідність. З цієї самої причини мала й теплопровідність пористих матеріалів (типу пінопласту), а також снігу, особливо такого, який щойно випав. «Теплий» сніговий покрив зберігає взимку від вимерзання ґрунт і рослини. Добра теплоізоляція подвійних віконних рам також зумовлена **повітряним** зазором між шибками.

Речовини з малою теплопровідністю використовують часто як **утеплювачі**.

Нижче схематично зображено в розрізі три стіни, що забезпечують **однакову** теплоізоляцію, — цегляна (рис. 22.3), дерев'яна (рис. 22.4) і зроблена з пінопласту (22.5).

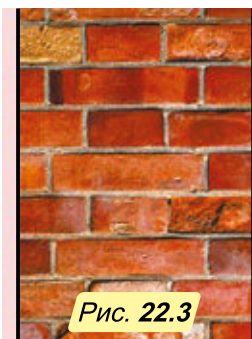


Рис. 22.3

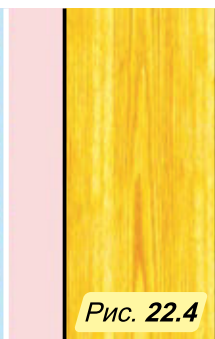


Рис. 22.4

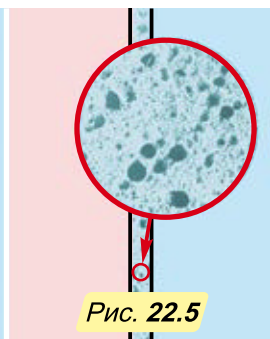


Рис. 22.5

КОНВЕКЦІЯ

Подихайте на руки — ви відчуєте, що вони нагріваються (рис. 22.6). При цьому відбувається теплообмін між ваши-

ми легенями й вашими руками, хоча вони й не торкаються одні одних. Теплообмін у цьому разі відбувається завдяки **перенесенню речовини** — потоку теплого повітря.



Вид теплообміну, зумовлений перенесенням речовини — потоками газу або рідини, називають конвекцією.

Конвекція має місце тільки **в рідинах і газах**.



Проведемо дослід

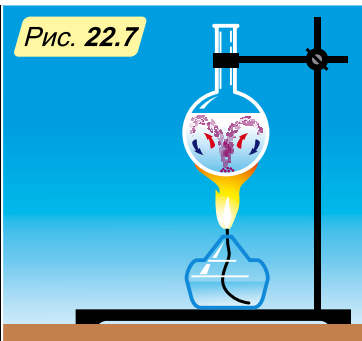
Щоб зробити конвекцію наочною, помістимо в колбу з водою трохи барвника й поставимо її на вогонь. Ми побачимо, що забарвлені шари води підіймаються в центральній частині колби й опускаються вздовж її стінок — схематично це показано на рис. 22.7. Завдяки такому «кругообігу» вода швидко прогрівається в усій колбі.

«Кругообіг» води в колбі — приклад **природної** конвекції: нагріта вода легша за холодну й тому підіймається вгору, а на її місце прибуває холодна вода. Як ми побачимо на прикладі наступної задачі, вітри також можуть виникати внаслідок природної конвекції.



Рис. 22.6

Рис. 22.7



Чому поблизу моря вітер удень дме зазвичай з моря, а вночі — з берега?

Удень ґрунт нагрівається сильніше, ніж вода. Нагріте повітря легше за холодне, воно підіймається, а на його місце прибуває прохолодніше повітря з моря — дме **денний** бриз (рис. 22.8). Уночі ж вода тепліша за ґрунт, унаслідок чого виникає **нічний** бриз — вітер з берега (рис. 22.9).

У наступних двох задачах розглянуто наслідки природної конвекції у побуті.

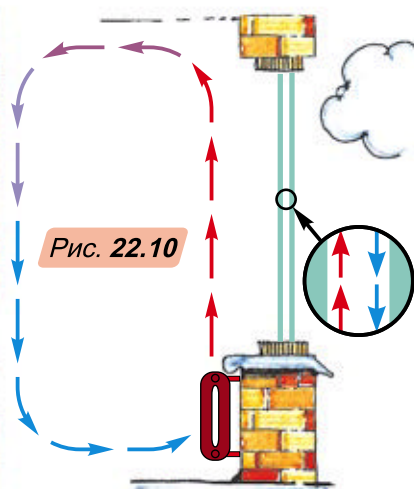
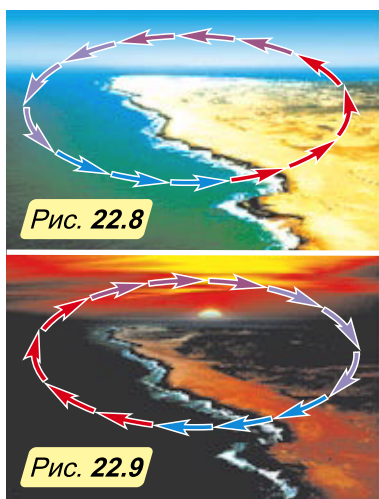


Чому опалювальні батареї встановлюють біля підлоги?

Зобразімо схематично потоки повітря в опалюваній кімнаті (рис. 22.10 ліворуч). Ми бачимо, що коли опалювальні батареї встановлені біля підлоги, завдяки природній конвекції обігрівается вся кімната. Якщо ж батареї були б установлені біля стелі, повітря у верхній частині кімнати було б теплим, а в нижній — холодним.

Чому склопакети з малим повітряним зазором забезпечують узимку кращу теплоізоляцію, ніж звичайні подвійні рами?

Уздовж холодного зовнішнього скла повітря, охолоджуючись, «стікає» вниз, а вздовж теплого внутрішнього скла, нагріваючись, підіймається (рис. 22.10 праворуч). Якщо повітряний зазор малий, зустрічні повітряні потоки гальмують один одного, тому такі вікна мають кращі теплоізоляційні властивості.



Коли ви дихаєте на руки, це — приклад **примусової** конвекції: потік повітря створюють ваші легені. Примусову конвекцію забезпечують також насоси (помпи) та вентилятори.

ВИПРОМІНЮВАННЯ



Проведемо дослід

Піднесіть знизу руку до ввімкненої лампи розжарювання (рис. 22.11). Ви відчуваєте тепло? Це означає, що між лампою та рукою відбувається теплообмін. Він зумовлений не теплопровідністю: теплопровідність повітря дуже мала. Але це й не конвекція: нагріте лампою повітря підіймається вгору, а руку ви піднесли **знизу**. Теплообмін у даному випадку зумовлений **випромінюванням**. Воно має електромагнітну природу.

Випромінюють енергію не тільки світні тіла: піднесіть (обережно!) руку до нагрітої праски теж **знизу**, і ви також відчуєте тепло (рис. 22.12). І в цьому випадку теплообмін відбувається внаслідок випромінювання. Отже,



теплообмін може відбуватися внаслідок електромагнітного випромінювання.



Рис. 22.11



Рис. 22.12

Кожному знайоме тепло, що йде від Сонця (рис. 22.13). Його зумовлює сонячне випромінювання: адже між Сонцем і Землею 150 мільйонів кілометрів безповітряного простору.

Теплообмін унаслідок випромінювання відіграє величезну роль у природі. Досить сказати, що сонячне проміння¹, як ви вже знаєте, є джерелом практично всіх видів енергії на Землі.

¹ Потік електромагнітної енергії називають промінням, а процес, за якого виникає цей потік, – випромінюванням.

Темні предмети поглинають світло краще, ніж світлі. Тому їх і сильніше нагріває Сонце.

Щоб зменшити нагрівання літаків сонячними променями, їх фарбують білою або сріблястою фарбою (рис. 22.14).



Запитання та завдання для самоперевірки



1. Наведіть приклади змінювання внутрішньої енергії за допомогою теплообміну.
2. Що таке кількість теплоти? Яка одиниця кількості теплоти?
3. Які види теплообміну вам відомі? Що в них спільного й чим вони відрізняються?
4. Виходячи з ваших відчуттів при дотику, визначте, теплопровідність якого матеріалу більша — металу чи деревини?
5. Що тепліше — три сорочки чи одна сорочка потрійної товщини?
6. Чому під час великої спеки (наприклад, улітку в Середній Азії) часто носять «теплі» халати?
7. Чому сталевари працюють у теплому одязі?
8. Чому в холодильника порівняно товсті стінки, заповнені пінопластом?
9. Склянка гарячого чаю, що стоїть у кімнаті, остигає. Опишіть, які види теплообміну при цьому відбуваються.
10. Чому взимку дме навіть від щільно зачиненого вікна?
11. Стінки термоса роблять подвійними, причому між ними створюють вакуум. Внутрішні поверхні стінок — дзеркальні. Пояснить, виходячи з цього, чому термос добре зберігає тепло (й холод).
12. Чому влітку краще носити світлий одяг?

1. Теплова рівновага і температура

2. Вимірювання температури

Хочеш дізнатися більше?

Чи є найвища й найнижча температури?

1. ТЕПЛОВА РІВНОВАГА І ТЕМПЕРАТУРА

У попередньому параграфі ми розглядали різні способи теплообміну.

Спільною властивістю всіх видів теплообміну є те, що **внаслідок теплообміну внутрішня енергія переходить завжди від більш нагрітого тіла до менш нагрітого**. Наприклад, від гарячого чаю — до повітря в кімнаті (завдяки теплопровідності та конвекції), від розжареного Сонця — до Землі (завдяки випромінюванню).

Напрямок теплообміну визначає фізична величина, яку називають **температурою**. Основна її властивість полягає в тому, що



внаслідок теплообміну внутрішня енергія переходить від тіла з більшою температурою до тіла з меншою температурою.

Температуру ми позначатимемо літерою t . Що вища температура тіла, то більша середня кінетична енергія хаотичного руху частинок цього тіла.

Якщо температури тіл **однакові**, кажуть, що тіла перебувають у **тепловій рівновазі**.

Наочним прикладом тіл, які перебувають у тепловій рівновазі одне з одним, є сухі предмети в одній кімнаті, якщо до неї не потрапляє пряме сонячне світло та вимкнено опалювальні прилади. Усі ці тіла перебувають у тепловій рівновазі з повітрям, і тому всі вони мають однакову температуру, що дорівнює температурі повітря.

Теплокровні істоти (люди, тварини, птахи) звичайно тепліші за навколишнє повітря, а вологі предмети — прохолодніші (внаслідок випаровування).

2. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Як, на вашу думку: чи можна довіряти безпосереднім відчуттям, визначаючи на дотик температуру тіл?

Не завжди. Наприклад, ми вже знаємо, що всі предмети в кімнаті мають однакову (кімнатну) температуру. Але, наприклад, дерев'яні предмети видаються на дотик теплими, а металеві — прохолодними.

А чи може *один і той самий предмет* видатися й теплим, і холодним *одночасно*?

Проведемо дослід



Поставте в ряд три банки. У ліву налейте теплої води, у праву — холодної, а в середню — води кімнатної температури. Опустіть на декілька хвилин пальці лівої руки в теплу воду, а пальці правої — у холодну (рис. 23.1), а потім опустіть обидві руки у воду з кімнатною температурою (рис. 23.2). Ліва рука сприйматиме цю воду прохолодною, а права — теплою!

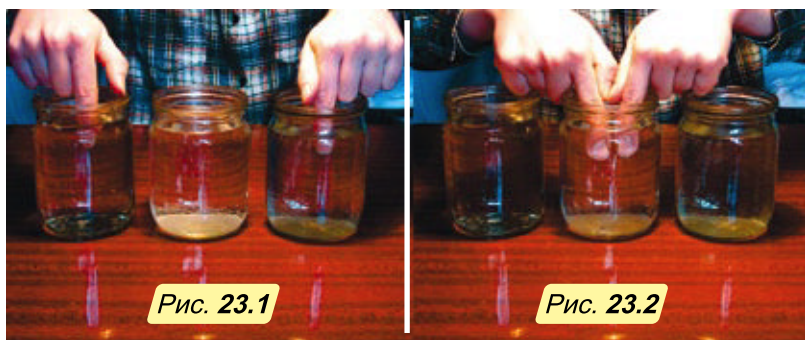


Рис. 23.1

Рис. 23.2

Розглянуті приклади показують, що для вимірювання температури потрібні вимірювальні прилади — **термометри**. Дію багатьох термометрів зумовлено тим, що різні речовини розширюються під час нагрівання *по-різному*.

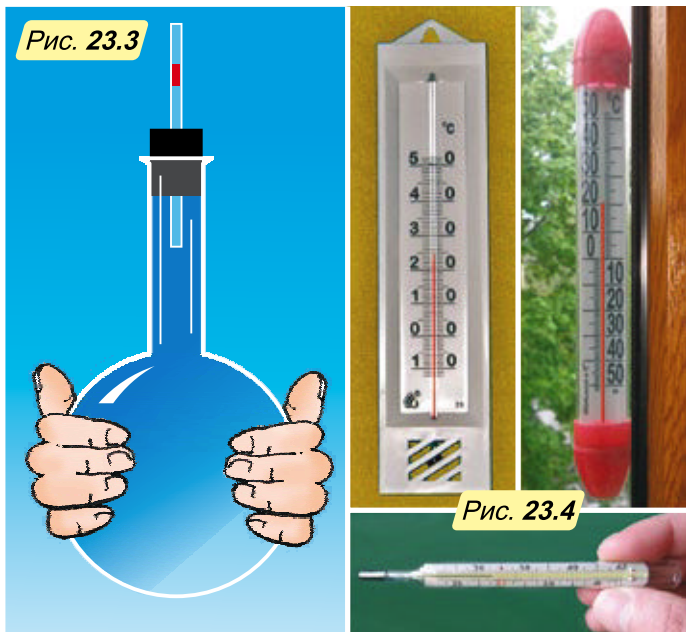
Проведемо дослід



Закриємо колбу корком, крізь який проходить тонка скляна трубка з краплею підфарбованої рідини (рис. 23.3). Якщо обхопити колбу руками, крапля почне підійматися.

Це свідчить про те, що повітря в колбі під час нагрівання **розширюється**. А завдяки використанню тонкої трубки навіть мала зміна об'єму повітря стає помітною.

Щоб наша колба з трубкою могла служити термометром, треба розмістити вздовж трубки шкалу. Саме такий термометр — газовий — і був історично першим термометром. Винайшов його вже знайомий вам Галілео Галілей.



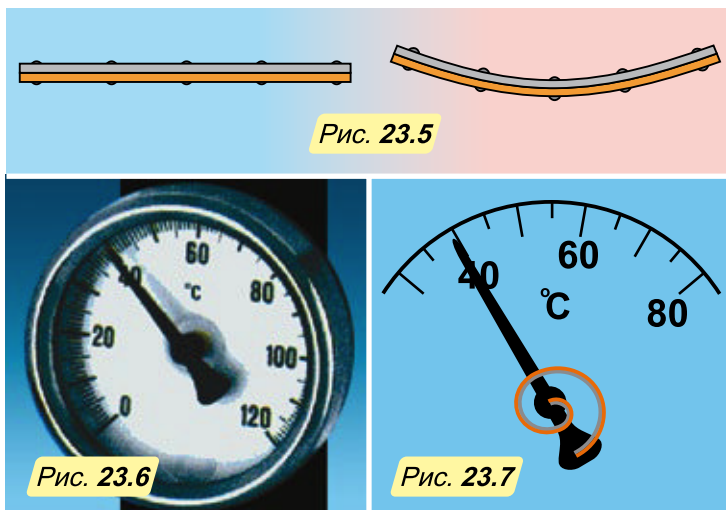
Газові термометри й сьогодні є одними з найточніших, але вони не дуже поширені через громіздкість та крихкість.

У побуті часто використовують **рідинні** термометри (рис. 23.4) зі ртуттю або підфарбованим спиртом. Щоб зміна рівня рідини була помітнішою, рідина підіймається всередині дуже тонкої трубки.

Для вимірювання температури також широко використовують **біметалеві** термометри.

Їх дія ґрунтується на тому, що біметалева пластинка, тобто пластинка, склепана або зварена з двох різних металів, унаслідок нагрівання згинається, оскільки різні метали під час нагрівання розширюються по-різному (рис. 23.5).

На рис. 23.6 зображено біметалевий термометр, а на рис. 23.7 показано схему його дії.



Біметалеві пластини використовують також для виготовлення **термореле** – пристроїв, які вмикають або вимикають електричний струм за заданих значень температури: нагріваючись чи охолоджуючись до заданої температури, біметалева пластинка згинається так, що замикає або розмикає електричне коло. Таке термореле є в деяких холодильниках.

ЯК КОРИСТУВАТИСЯ ТЕРМОМЕТРОМ?

Усі ви знаєте, що коли ви вимірюєте температуру тіла, треба потримати термометр під пахвою п'ять-сім хвилин (рис. 23.8).





Чому недостатньо лише доторкнутися термометром до тіла, щоб він показав температуру цього тіла?

Термометр завжди показує **свою** температуру! Вона дорівнюватиме температурі певного тіла тільки за умови, що термометр перебуває з цим тілом у **тепловій рівновазі**. Для встановлення ж теплової рівноваги необхідно, щоб між тілом і термометром відбувся теплообмін, а для цього потрібен **деякий час**.

ШКАЛА ЦЕЛЬСІЯ

Для побудови температурної шкали використовують так звані «реперні точки», які відповідають певним значенням температури. У розповсюдженій у нас **шкалі Цельсія**, яку названо на честь шведського астронома Андерса Цельсія, такими точками вибрано температуру танення льоду (їй відповідає 0 градусів) і температуру кипіння води (їй відповідає 100 градусів). Вибір цих реперних точок зумовлений тим, що за нормального атмосферного тиску танення льоду та кипіння води відбуваються за цілком певних значень температури.

Градуси Цельсія позначають значком $^{\circ}\text{C}$. Наприклад, температура танення льоду дорівнює 0°C , температура кипіння води дорівнює 100°C , а кімнатній температурі відповідає приблизно 20°C .



Хочеш дізнатися більше?

ЧИ Є НАЙВИЩА ТА НАЙНИЖЧА ТЕМПЕРАТУРИ?

Верхньої межі для значень температури не встановлено: наприклад, температура поверхні Сонця — близько $6\,000^{\circ}\text{C}$, у надрах Сонця температура сягає $15\,000\,000^{\circ}\text{C}$, а під час вибухів зір температура може сягати десятків мільярдів градусів!

А от найнижча температура є — це температура, за якої хаотичний рух частинок припиняється. Вона дорівнює приблизно -273°C : це «абсолютний холод».

1. Яка спільна властивість усіх видів теплообміну? Наведіть приклади, які підтверджують вашу відповідь.
2. Тіло А перебуває в тепловій рівновазі з тілом Б, а тіло Б — з тілом В. Чи перебувають тіла А і В у тепловій рівновазі одне з одним?
3. Яка фізична величина визначає напрям теплообміну?
4. Що можна сказати про температуру тіл, які перебувають у тепловій рівновазі? Наведіть приклади тіл, які перебувають у тепловій рівновазі.
5. Чи можна довіряти безпосереднім відчуттям, визначаючи температуру? Обґрунтуйте вашу відповідь прикладами.
6. Під час нагрівання стовпчик рідинного термометра підіймається. Який висновок можна зробити з цього про те, що розширюється внаслідок нагрівання більше — рідина чи скло?
7. Опишіть будову різних видів термометрів. На чому ґрунтується їхня дія? Як треба користуватися термометром, вимірюючи температуру?
8. На рис. 23.5 зображено два стани біметалевої пластинки, виробленої з міді та сталі. Жовтим кольором позначено мідь. Якому станowi пластинки відповідає вища температура, якщо мідь розширюється внаслідок нагрівання більше, ніж сталь?
9. Як побудовано шкалу Цельсія? Які реперні точки використано для цієї шкали?

1. Питома теплоємність
2. Вимірювання питомої теплоємності

1. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ

Ви вже знаєте, що для нагрівання тіла шляхом теплообміну йому треба передати деяку кількість теплоти.

Досліди показують, що кількість теплоти, яку треба передати однорідному тілу (яке складається з однієї речовини) для нагрівання його *на задане число градусів*, залежить від *речовини*, з якої складається тіло, і *маси* тіла. Виміри показують, що кількість теплоти, яку одержує тіло під час нагрівання,

$$Q = cm(t_k - t_n).$$

Тут t_n — початкова температура тіла, t_k — його кінцева температура, m — маса тіла.

Коефіцієнт пропорційності c залежить від *речовини*, з якої складається певне тіло. Його називають *питомою теплоємністю* цієї речовини.

Під час остигання від температури t_n до температури t_k тіло віддає кількість теплоти $Q = cm(t_k - t_n)$.

Питома теплоємність — характеристика *речовини*, з якої складається тіло.

Якщо відомі передана тілу кількість теплоти Q , маса тіла m , а також початкова й кінцева температури тіла, то питому теплоємність можна знайти за формулою $c = \frac{Q}{m(t_k - t_n)}$. Ця

формула розкриває *фізичний зміст питомої теплоємності*: вона чисельно дорівнює кількості теплоти, яку треба передати тілу масою 1 кг, що складається з певної речовини, щоб підвищити його температуру на 1 °C. Із цієї формули

випливає, що одиниця питомої теплоємності $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

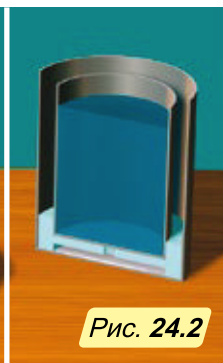
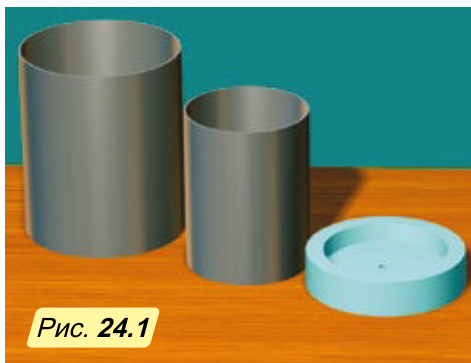
2. ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ

ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ ВОДИ

Питому теплоємність води вимірів уперше англійський учений Д. П. Джоуль. Нагадаємо: Джоуль установив, що для нагрівання 1 кг води на 1 °С треба виконати роботу, що дорівнює 4200 Дж. Для такого нагрівання тієї самої води шляхом теплообміну її внутрішню енергію треба збільшити на стільки ж, тобто передати їй кількість теплоти, що дорівнює теж 4200 Дж. Отже, питома теплоємність води дорівнює $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Знаючи питому теплоємність води, можна вимірити питому теплоємність інших речовин за допомогою **калориметра**. Найпростіший калориметр, використовуваний у шкільних лабораторних роботах, складається з двох стаканів, уставлених один в один (рис. 24.1, 24.2). Повітряний прошарок і підставка зменшують теплообмін між умістом внутрішнього стакана та повітрям.



Наллємо в калориметр води й помістимо в неї яке-небудь тіло, температура якого не дорівнює температурі води. Цим тілом може бути тверде тіло, наприклад металевий брусок, або певна кількість рідини. Між тілом і водою почнеться теплообмін, у результаті чого їхні температури через деякий час зрівняються.

Наприклад, якщо початкова температура тіла вища за температуру води, то в процесі теплообміну тіло віддасть воді деяку кількість теплоти $Q_{\text{т}}$, а вода одержить кількість теплоти $Q_{\text{в}}$. Якщо теплообміном із калориметром та навколишнім повітрям можна знехтувати, то із закону збереження енергії випливає, що $Q_{\text{т}} = Q_{\text{в}}$. Рівняння такого виду називають **рівнянням теплового балансу**.

Це рівняння можна застосувати, наприклад, для визначення температури води, що отримана змішуванням холодної та гарячої води. Розв'яжімо таку задачу.



У калориметрі змішали 100 г води, яка має температуру 60°C, та 50 г води, яка має температуру 10°C. Яка температура суміші? Будемо вважати, що теплообміном з калориметром і навколишнім повітрям можна знехтувати.

Позначмо маси гарячої та холодної води m_1 і m_2 , їхні температури t_1 і t_2 , а температур суміші t . У процесі теплообміну гаряча вода **віддасть** кількість теплоти $Q_1 = cm_1(t_1 - t)$, де c — питома теплоємність води. Холодна ж вода **одержить** кількість теплоти $Q_2 = cm_2(t - t_2)$. Згідно з рівнянням теплового балансу $Q_1 = Q_2$, звідки маємо: $cm_1(t_1 - t) = cm_2(t - t_2)$. Розв'язуючи це рівняння відносно невідомої величини t , дістанемо

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $t = \frac{0,1 \cdot 60 + 0,05 \cdot 10}{0,1 + 0,05} \approx 43(^{\circ}\text{C})$.

ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ

Для вимірювання питомої теплоємності за допомогою калориметра використовують рівняння теплового балансу (див. лабораторну роботу № 14). Розгляньмо це на прикладі.



У калориметр, який містить 0,1 кг води за температури 20°C, занурили алюмінієвий брусок масою 0,2 кг, вийнятий із окропу (100°C). У результаті теплообміну в калориметрі встановилася температура 44°C. Чому дорівнює питома теплоємність алюмінію? Будемо вважати, що теплообміном із калориметром і навколишнім повітрям можна знехтувати.

Позначмо маси води та металевго бруска $m_{\text{в}}$ і $m_{\text{м}}$, їхні початкові температури $t_{\text{в}}$ і $t_{\text{м}}$, а кінцеву температуру вмісту калориметра t . У процесі теплообміну брусок віддасть кількість

теплоти $Q_m = c_m m_m (t_m - t)$, а вода одержить кількість теплоти, що дорівнює $Q_b = c_b m_b (t - t_b)$. Згідно з рівнянням теплового балансу $Q_m = Q_b$, звідки дістаємо $c_m m_m (t_m - t) = c_b m_b (t - t_b)$. Із цього рівняння випливає, що $c_m = c_b \frac{m_b (t - t_b)}{m_m (t_m - t)}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо

$$c_m = 4200 \cdot \frac{0,1 \cdot (44 - 20)}{0,2 \cdot (100 - 44)} = 900 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right).$$

У таблиці наведено значення питомої теплоємності для деяких речовин.

Речовина	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Речовина	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Золото	130	Олія	1 700
Свинець	130	Лід	2 100
Мідь	390	Спирт	2 400
Алюміній	900	Вода	4 200

У наведеній таблиці різні речовини розміщені для наочності в порядку збільшення їхньої питомої теплоємності: ми бачимо, що значення питомої теплоємності різних речовин відрізняються в десятки разів.

Зверніть увагу на досить велику питому теплоємність води: для нагрівання 1 літра води (1 кг) на 1°C воді треба передати кількість теплоти 4 200 Дж.



Найвищий у світі водоспад Сальто-Анхель у Венесуелі має висоту 980 м. На скільки нагрівається вода внаслідок удару після падіння з такої висоти? Будемо вважати для оцінки, що на нагрівання води витрачається 50 % її механічної енергії.

Розгляньмо падіння води масою m . Перебуваючи на висоті h , ця вода мала потенціальну енергію $E_n = mgh$. Під час нагрівання води на Δt її внутрішня енергія збільшується на $cm\Delta t$, де c — питома теплоємність води. Оскільки на нагрівання води витрачається 50 % її механічної енергії, маємо $cm\Delta t = 0,5 \cdot mgh$, звідки $\Delta t = 0,5 \frac{mgh}{cm}$. Перевіривши

одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо

$$\Delta t = 0,5 \frac{gh}{c} = 0,5 \cdot \frac{10 \cdot 980}{4200} = 1,2 (^{\circ}\text{C}).$$

Отже, навіть коли вода падає з такої величезної висоти, її нагрівання буде практично непомітним!

Електроенергію виробляють, зокрема, на гідроелектростанціях, де механічна енергія води, що падає, перетворюється в генераторах в електричну енергію. Уявіть, які величезні маси води цілодобово «падають» з високих гребель гідроелектростанцій (рис. 24.3), якщо одержаної електроенергії вистачає для забезпечення енергією великих міст (рис. 24.4)!

Велика теплоємність води є однією з причин м'якого клімату в місцевостях, розташованих поблизу морів та океанів. Для **морського** клімату характерна відсутність сильної спеки влітку та великих морозів узимку, а також невеликі добові перепади температури (між днем і ніччю). Річ у тім, що внаслідок великої питомої теплоємності вода повільно нагрівається (улітку та вдень), але зате й повільно остигає (узимку та вночі), віддаючи тепло. Ось чому величезні маси води значно пом'якшують температурні коливання.

У місцевостях же, розташованих далеко від моря, клімат **континентальний** — для нього характерні значні перепади температур: наприклад, у пустелі вдень дуже жарко, а вночі буває дуже холодно!

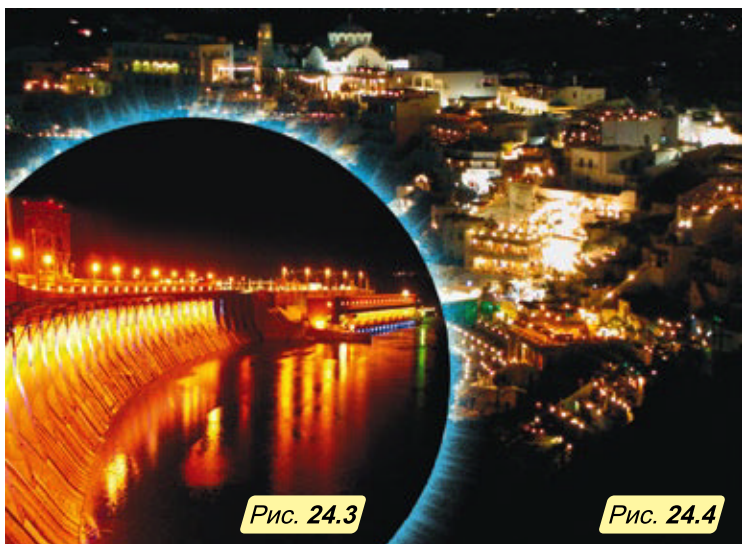


Рис. 24.3

Рис. 24.4

1. Від чого залежить кількість теплоти, яку необхідно передати тілу для нагрівання?
2. Що таке питома теплоємність? Який її фізичний зміст?
3. З якої висоти мала б падати вода, щоб унаслідок удару об землю вона закипіла? Приміть для оцінки, що на нагрівання води йде 50 % потенціальної енергії води.
4. Хто і як виміряв питому теплоємність води?
5. Що таке рівняння теплового балансу? Наслідком якого закону збереження воно є?
6. Який об'єм окропу треба долити до 30 л води з температурою 10°C , щоб температура води дорівнювала 36°C ? Уважайте, що тепловими втратами можна знехтувати.
7. У склянку з водою за температури 20°C занурили мідний кубик масою 100 г, який витягли з окропу. До якої температури нагріється вода? Уважайте, що тепловими втратами можна знехтувати. Маса води в склянці 100 г.
8. Опишіть будову калориметра. Для чого він призначений?
9. Як вимірюють теплоємність різних речовин?
10. Як велика теплоємність води впливає на клімат? Наведіть приклад, який підтверджує вашу відповідь.

1. Питома теплота згоряння
2. Коефіцієнт корисної дії нагрівача

1. ПИТОМА ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ

Ви вже знаєте, що внаслідок хімічних реакцій, тобто перетворень одних речовин в інші, може виділятися енергія. Особливо велика енергія виділяється у разі **горіння**. Енергія, що виділяється під час згоряння викопного палива (вугілля, газу, нафти), — нині основне джерело енергії для людства.

Кількість теплоти Q , що виділилася внаслідок повного згоряння палива, пропорційна його масі:

$$Q = qm.$$

Коефіцієнт пропорційності q називають **питомою теплотою згоряння палива**.

Якщо відомі кількість теплоти Q , що виділилася внаслідок згоряння палива, та маса палива m , питому теплоту згоряння можна знайти за формулою $q = \frac{Q}{m}$. Ця формула розкриває **фізичний зміст питомої теплоти згоряння палива**: вона чисельно дорівнює кількості теплоти, яка виділяється внаслідок повного згоряння 1 кг палива.

Із цієї формули також випливає, що одиницею питомої теплоти згоряння палива є $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ (джоуль на кілограм). Однак значення питомої теплоти згоряння більшості видів палива вимірюють у **мільйон** разів більшою одиницею, тобто $1 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ (мегаджоуль на кілограм).

У таблиці наведено значення питомої теплоти згоряння деяких видів палива.

Речовина	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Дрова сухі	12	Природний газ	44
Спирт	26	Бензин	44
Вугілля (антрацит)	27	Водень	120

Із цієї таблиці видно, що в результаті згоряння палива виділяється величезна енергія. Особливо велика питома теплота згоряння водню, тому його використовують як паливо у двигунах ракетних кораблів.

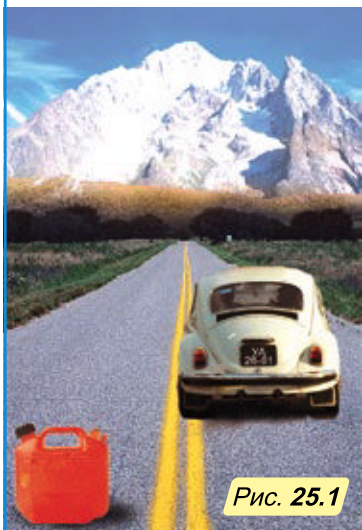


Рис. 25.1

На яку висоту можна підняти легковий автомобіль масою 1 т, витративши енергію, що дорівнює енергії, яка виділяється під час згоряння 3 л бензину? Густина бензину $700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Маса бензину, що згорів, $m_b = \rho V$, де ρ — густина бензину, V — його об'єм (що дорівнює в такому разі $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$). Під час згоряння цієї маси бензину виділяється енергія $Q = qm_b = q\rho V$. Піднімаючи автомобіль масою m_a на висоту h , виконують роботу $A = m_a g h$.

Прирівнюючи цю роботу енергії, що виділилася внаслідок згоряння бензину, маємо $m_a g h = q\rho V$, звідки $h = \frac{q\rho V}{m_a g}$.

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $h = \frac{44 \cdot 10^6 \cdot 700 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 10} = 9200 \text{ (м)} = 9,2 \text{ (км)}$. Це вище за найвищу гору на Землі (рис. 25.1)!

Однак щоб насправді підняти автомобіль на таку висоту (якби було побудовано таку гірську дорогу й автомобільний двигун міг би працювати в дуже розрідженому гірському повітрі), потрібно було б у декілька разів більше бензину.

Річ у тім, що в будь-якому тепловому двигуні (до яких належить і автомобільний двигун) далеко не всю енергію, що виділилася внаслідок згоряння палива, вдається перетворити на механічну енергію. Частина енергії, що виділилася внаслідок згоряння палива, витрачається на так звані «теплові втрати» — переважно на «обігрівання» доквілля.

2. КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ НАГРІВАЧА

Під час згоряння палива тільки частину кількості виділеної теплоти вдається передати тілу, яке нагрівають.



Коефіцієнтом корисної дії (ККД) нагрівача називають виражене у відсотках відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання, до кількості теплоти, виділеної під час згоряння палива.

Якщо не вживати спеціальних заходів, що запобігають «викиду тепла» в довкілля, ККД нагрівача буде досить низьким. Розгляньмо приклад.



Щоб довести на вогнищі до кипіння воду в повному трилітровому казанку, спалили 2 кг сухих дров. Яка частина кількості теплоти, що виділилася внаслідок згоряння дров, пішла на нагрівання води, якщо початкова температура води була 20°C?

Унаслідок згоряння дров виділилася кількість теплоти $Q_d = qm_d$, де q — питома теплота згоряння дров, m_d — їхня маса. Для нагрівання води в казанку до кипіння треба передати воді кількість теплоти $Q_v = cm_v(t_{\text{кип}} - t_{\text{поч}})$, де c — питома теплоємність води, m_v — маса води (3 кг), $t_{\text{кип}}$ і $t_{\text{поч}}$ — кінцева та початкова температури води. Шукана величина

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_v}{Q_d} \cdot 100\% = \frac{cm_v(t_{\text{кип}} - t_{\text{поч}})}{qm_d} \cdot 100\% = \\ &= \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot (100 - 20)}{12 \cdot 10^6 \cdot 2} \cdot 100\% = 4,2\%.\end{aligned}$$

Як бачимо, «коефіцієнт корисної дії вогнища», якщо вважати корисною його дією тільки нагрівання води в казанку, становить усього кілька відсотків! Ось які великі теплові втрати, коли не вживають жодного заходу для зменшення «обігрівання довкілля».

Щоправда, у випадку з вогнищем навряд чи можна вважати їх зовсім уже втратами: адже й туристи, мабуть, грілися біля вогнища, поки на ньому підігрівали казанок з водою (рис. 25.2).



У техніці для підвищення ККД нагрівача вживають заходів для зменшення теплових втрат: нагрівач разом з тілом, яке нагрівають, розміщують у спільній оболонці, що зменшує викид тепла в довкілля.

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Яка формула виражає кількість теплоти, що виділилася внаслідок згоряння палива?
2. Що таке питома теплота згоряння? Який її фізичний зміст?
3. У туристів останнього дня походу лишилося в примусі 100 мл бензину. Чи зможуть вони закип'ятити трилітровий казанок води, якщо ККД примуса дорівнює 30 %? Уважайте, що початкова температура води дорівнює 20°C , а густина бензину дорівнює $700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
4. У великому місті протягом доби брали ванну сто тисяч мешканців. Оцініть, скільки вугілля потрібно було спалити для нагрівання води. Приміть для оцінки, що об'єм ванни дорівнює 100 л, температура водопровідної води 10°C , а температура води у ванні 35°C . Уважайте, що ККД нагрівача дорівнює 25 %.

1. Плавлення

2. Кристалізація

Хочеш дізнатися більше?

Особлива властивість води й льоду

1. ПЛАВЛЕННЯ

Як ви знаєте, речовина може перебувати у твердому, рідинному¹ чи газоподібному стані. Нагадаємо, що ці стани речовини називають **агрегатними** станами.

Від чого ж залежить, у якому стані перебуватиме певна речовина?

Відповідь на це запитання можуть дати спостереження за водою.

Щовесни ми спостерігаємо **танення льоду**: вода переходить із твердого стану в рідинний (рис. 26.1). Причому перехід води з твердого стану в рідинний відбувається **за певної температури**, яка дорівнює 0°C . Саме тому температуру танення льоду й вибрали як одну з реперних точок шкали Цельсія.



Вода не є винятком: нині встановлено, що у разі нагрівання до певної температури будь-яке кристалічне тверде тіло перетворюється в рідину, тобто **плавиться**.

¹ Цей стан речовини раніше називали також рідким.

Перехід речовини із кристалічного стану в рідинний називають плавленням.

Плавлення кожної речовини відбувається за певної температури, яку називають температурою плавлення цієї речовини.



У цій таблиці наведено температури плавлення деяких речовин.

Речовина	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Речовина	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
Водень	-259	Свинець	327
Спирт	-114	Срібло	962
Ртуть	-39	Залізо	1539
Лід	0	Вольфрам	3410

Початок цієї таблиці може викликати здивування, однак не лише водень, а й усі інші речовини, які ми звикли вважати «виключно» газами, — кисень, азот тощо, — усі вони за дуже низьких температур перебувають у твердому стані.

Чому ж кристалічні речовини внаслідок нагрівання плавляться?

Згадаймо, що частинки (атоми або молекули), з яких складається кристалічне тіло, розташовані впорядковано, утворюючи **кристалічні ґратки**. При цьому, однак, частинки не перебувають у спокої, а коливаються біля своїх «положень рівноваги», причому що вища температура тіла, то більша кінетична енергія частинок, а отже, то більша амплітуда цих коливань. І за певної температури — яка саме й дорівнює температурі плавлення! — амплітуда коливань стає настільки великою, що кристалічні ґратки руйнуються. При цьому й відбувається перехід речовини з твердого стану в рідинний: адже для рідинного стану якраз і характерна відсутність порядку в розташуванні частинок речовини.

Температура плавлення речовини то вища, що сильніше взаємодіють частинки цієї речовини. Так, молекули водню взаємодіють одна з одною дуже слабо, тому водень плавиться вже за дуже низької температури. А ось атоми металів взаємодіють значно сильніше, тому в багатьох ме-

талів температура плавлення досить висока. Щоправда, і тут є виняток: ртуть — метал, але за кімнатної температури вона перебуває в рідинному стані.

В аморфних тілах, на відміну від кристалічних, певної температури плавлення немає: під час нагрівання вони розм'якшуються поступово. Скло є аморфною речовиною, тому з розм'якшеного внаслідок нагрівання скла можна «видувати» бутлі, флакони тощо.

ПИТОМА ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕННЯ



Проведемо дослід

Поставимо в кімнаті посудину зі снігом або дрібно накришеним льодом, температура якого нижча за 0°C . Унаслідок теплообміну тепле повітря передаватиме льоду деяку кількість теплоти, і його температура почне підвищуватися (рис. 26.2).

Але коли лід почне *танути*, стовпчик термометра зупиниться на показі 0°C . І доки аж весь лід не розтане, температура буде залишатися сталою (рис. 26.3), хоча теплообмін з теплим повітрям триває!

Тільки коли розтане весь лід, стовпчик термометра знову поповзе вгору: утворена з льоду вода почне нагріватися (рис. 26.4). Отже,



щоб розплавити кристалічне тіло, треба передати йому певну кількість теплоти, тобто збільшити його внутрішню енергію. Температура в процесі плавлення не змінюється.



Чому температура суміші води з льодом залишається сталою, аж поки весь лід не розтане, хоча внаслідок теплообміну з теплим повітрям внутрішня енергія суміші весь час збільшується?

Одержана енергія йде на збільшення потенціальної енергії взаємодії частинок речовини під час руйнування кристалічних ґраток і перетворення речовини із кристалічного стану в рідинний.

Зверніть увагу: під час плавлення *внутрішня енергія тіла збільшується, але температура тіла не змінюється!*

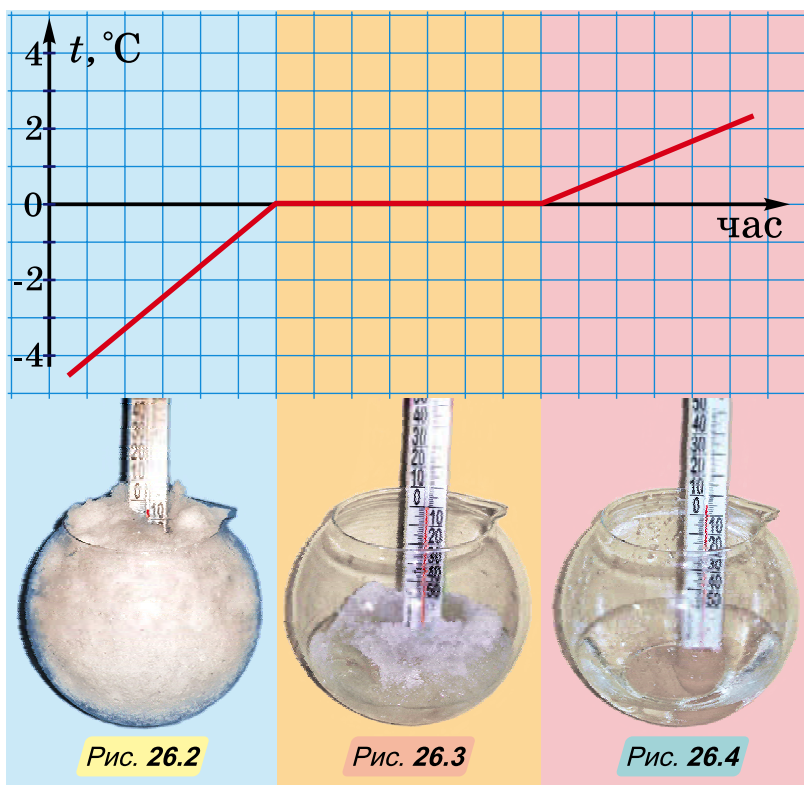


Рис. 26.2

Рис. 26.3

Рис. 26.4

Досліди свідчать, що кількість теплоти Q , необхідна для того, щоб повністю розплавити кристалічне тіло за температури плавлення, пропорційна масі тіла m :

$$Q = \lambda m.$$

Коефіцієнт пропорційності λ називають **питомою теплотою плавлення**. Якщо відомі кількість теплоти Q і маса тіла m , питому теплоту плавлення можна знайти за формулою $\lambda = \frac{Q}{m}$. Ця формула розкриває **фізичний зміст питомої теплоти плавлення**: вона чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати кристалічному тілу масою 1 кг за температури плавлення, щоб повністю перетворити його на рідину. Із цієї формули

також впливає, що одиницею питомої теплоти плавлення є 1 Дж/кг (джоуль на кілограм).

Нижче наведено значення питомої теплоти плавлення для деяких речовин.

Речовина	$\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Ртуть	12	Срібло	87
Свинець	24	Лід	330
Водень	59	Алюміній	390



До якої температури можна нагріти воду, передавши їй ту саму кількість теплоти, яка необхідна для того, щоб розплавити таку саму масу льоду за температури 0 °С? Початкова температура води 20 °С.

Для нагрівання води масою m від температури $t_{\text{поч}}$ до температури $t_{\text{кін}}$ їй треба передати кількість теплоти $Q_1 = cm(t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})$, де c — питома теплоємність води. Щоб розтопити лід такої самої маси, йому треба передати кількість теплоти $Q_2 = \lambda m$. Прирівнюючи ці вирази, маємо $cm(t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}) = \lambda m$, звідки

$t_{\text{кін}} = t_{\text{поч}} + \frac{\lambda}{c}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши чис-

лові дані, отримаємо $t_{\text{кін}} = 20 + \frac{330 \cdot 10^3}{4,2 \cdot 10^3} = 99$ (°С). Отже, щоб розтопити лід, треба витратити приблизно стільки ж енергії, скільки треба її для того, щоб таку саму масу води кімнатної температури довести до кипіння!

Те, що для плавлення тіла до нього необхідно весь час підводити тепло, першим установив на досліді шотландський учений Джозеф Блек у середині 18-го століття.

Він писав: «Якби лід не мав великої теплоти плавлення, навесні вся маса льоду мала б розтанути за декілька хвилин або секунд, оскільки теплота безперервно передається льоду з повітря. Наслідки цього були б жахливі; адже й за наявного становища виникають великі повені та сильні потоки води під час танення великих мас льоду і снігу».



Озеро завдовжки 3 км й завширшки 1 км укрито 10-сантиметровим шаром льоду. Яку кількість теплоти треба передати цьому льоду за температури 0 °С, щоб розтопити його?

Шукана кількість теплоти $Q = \lambda m_n$, де маса льоду $m_n = \rho V_n = \rho l s d$. Тут ρ — густина льоду, l , s , d — довжина, ширина й товщина шару льоду. Отже, $Q = \lambda \rho l s d$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $Q = 330 \cdot 10^3 \cdot 900 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \approx 9 \cdot 10^{13}$ (Дж).

Щоб уявити цю кількість теплоти, оцінімо, якої маси вантаж можна було б підняти на 30-й поверх (приблизно 100 м), виконавши роботу, що чисельно дорівнює цій кількості теплоти. Щоб підняти вантаж масою m_b на висоту h , треба виконати роботу $A = m_b g h$.

Прирівнюючи її до знайденої кількості теплоти, маємо $m_b = \frac{\lambda \rho l s d}{g h}$.

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $m_b = \frac{9 \cdot 10^{13}}{10 \cdot 100} = 9 \cdot 10^{10}$ (кг) = $9 \cdot 10^7$ (т). Оцінімо довжину поїзда, який міг би перевезти вантаж такої маси.

Якщо вважати, що вагон містить 50 т, а довжина кожного вагона 22 м,

то для перевезення такого вантажу потрібно $\frac{9 \cdot 10^7}{50} = 1,8 \cdot 10^6$ ва-

гонів. Загальна довжина цих вагонів становила б 40 000 км. Це дорівнює довжині земного екватора! Наш розрахунок дозволяє уявити масштаб перетворень енергії в природі: адже описане в умові озеро дуже мале порівняно з розмірами земної кулі!

2. КРИСТАЛІЗАЦІЯ

Проведемо дослід



Почнімо тепер охолоджувати посудину з водою. Ми помітимо, що температура води спочатку знижуватиметься до 0°C і на цьому значенні температури стовпчик термометра знову зупиниться (рис. 26.5)! За цієї температури вода почне перетворюватися на лід.

Перехід речовини з рідинного стану в кристалічний називають кристалізацією (або твердненням). Кристалізація відбувається за тієї самої температури, що і плавлення, тобто за температури плавлення.



Коли вся вода перетвориться на лід, його температура почне знижуватися (рис. 26.5).

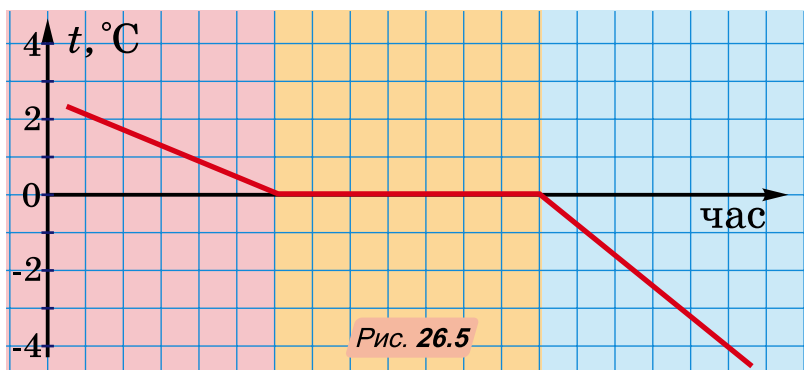


Рис. 26.5

? Поглинається чи виділяється тепло під час кристалізації?

Для кристалізації необхідно **відбирати** в рідині деяку кількість теплоти. Отже, під час кристалізації рідина **віддає** деяку кількість теплоти. Це значно пом'якшує похолодання на початку зими: холодне повітря **дістає тепло** від водойм, що замерзають.

Під час кристалізації 1 кг рідини виділяється така сама кількість теплоти, яку поглинає під час плавлення 1 кг кристала.

? Як змінюється внутрішня енергія тіла під час кристалізації?

Під час кристалізації внутрішня енергія тіла зменшується внаслідок зменшення потенціальної енергії взаємодії частинок тіла при утворенні кристалічних ґраток.



Хочеш дізнатися більше?

ОСОБЛИВА ВЛАСТИВІСТЬ ВОДИ ТА ЛЬОДУ

Густина льоду менша за густину води, тому крига плаває у воді (рис. 26.6). При цьому, як ви вже знаєте, основна частина водяної гори — айсберга перебуває під водою й невидима.

Мала густина льоду зумовлена його молекулярною структурою: у кристалічних ґратках льоду (рис. 26.7) молекули розташовані «просторіше», ніж у воді (рис. 26.8).

Рис. 26.6

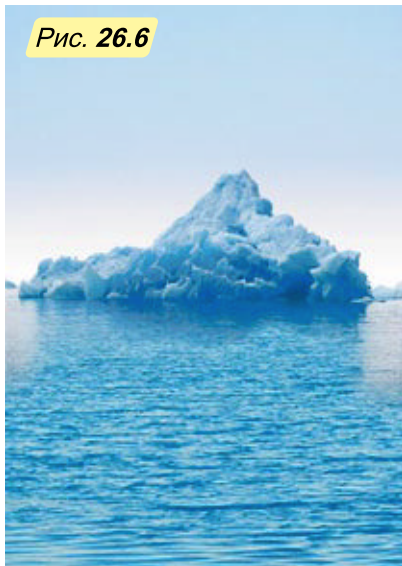


Рис. 26.7

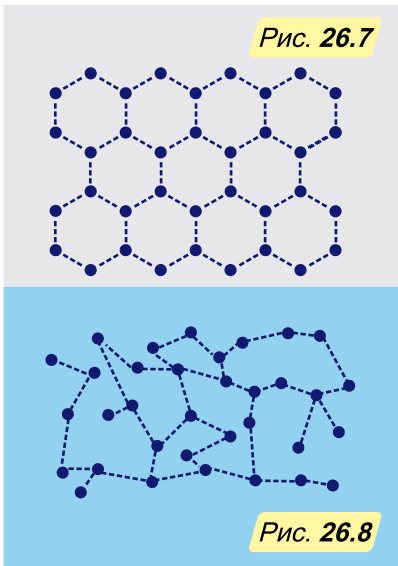


Рис. 26.8

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Що таке плавлення? Наведіть приклади цього явища.
2. Які тіла можуть плавитися — кристалічні чи аморфні?
3. Який фізичний зміст питомої теплоти плавлення?
4. Чи може внутрішня енергія тіла змінюватися за сталої температури? Наведіть приклади, що підтверджують вашу відповідь.
5. На що йде енергія, яку підводять до тіла у процесі плавлення?
6. Срібну й алюмінієву кулі рівних радіусів нагріто кожну до своєї температури плавлення. Для повного плавлення якої з них потрібна більша кількість теплоти? Густина срібла дорівнює $10\,500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
7. Що таке кристалізація? За якої температури вона відбувається? Виділяється чи поглинається теплота під час кристалізації?
8. Чому замерзання води у тріщинах гір призводить до їх руйнування?
9. Чому наповнені водою сталеві труби лопаються на морозі?

§27

ПАРООУТВОРЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ

1. Пароутворення та конденсація

2. Кипіння

3. Питома теплота пароутворення

Хочеш дізнатися більше?

Чи можуть випаровуватися тверді тіла?

Чи може вода кипіти за кімнатної температури?

1. ПАРООУТВОРЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ



Проведемо дослід

Накрийте кришкою каструлю з гарячою водою. Через декілька хвилин зніміть кришку — ви побачите на ній крапельки води (рис. 27.1). Як на кришці з'явилася вода?

Це — результат «подвійного перетворення». Вода в каструлі випаровується, перетворюючись на *пару*, тобто переходить у газоподібний стан. Потрапивши на кришку, пара знову перетворюється на воду.



Перетворення рідини на пару називають пароутворенням, а перетворення пари на рідину — конденсацією.

Якщо пароутворення відбувається з вільної поверхні рідини, його називають *випаровуванням*.

Випаровування відбувається за будь-якої температури: наприклад, калюжі після дощу висихають і в холодну погоду.

Під час конденсації *невидима* пара перетворюється на *видимі* крапельки води: так, білястий струмінь, який вивирається з носика чайника, що кипить, являє собою не пару, а *туман*, який складається з крихітних крапельок води, що утворилися під час конденсації водяної пари (рис. 27.2). Хмарка, що вилітає з рота на морозі, — теж туман (рис. 27.3).



Рис. 27.2



Рис. 27.3

Великий кругообіг води в природі, про який ми вже не раз згадували, зумовлений випаровуванням води та конденсацією водяної пари. Нагріта Сонцем вода в морях і океанах випаровується, перетворюючись на водяну пару. Вологе повітря підіймається вгору, розширюючись при цьому. Розширюючись, повітря охолоджується, і водяна пара, що міститься в ньому, конденсується, утворюючи хмари, які складаються з крапельок води.



Чому волога тканина внаслідок прасування гарячою праскою практично зразу стає сухою?

Під час випаровування з рідини виринають «найшвидші» молекули — тільки їм вдається подолати притягання молекул-сусідів. З підвищенням температури частка молекул, здатних вирватися із рідини, збільшується, тому **з підвищенням температури швидкість випаровування збільшується.**



Чому після купання ми відчуваємо прохолоду?

Ми вже знаємо, що під час випаровування рідину покидають найшвидші молекули, що мають найбільшу кінетичну енергію. У результаті середня кінетична енергія решти молекул зменшується, тобто **внаслідок випаровування температура рідини знижується**.

2. КИПІННЯ



Проведемо дослід

Поставте широку каструлю з невеликою кількістю води на ввімкнену плиту. Через деякий час біля дна каструлі почнуть з'являтися бульбашки (рис. 27.4). Це почало виділятися розчинене у воді повітря.

Усередину бульбашок починає випаровуватися вода. Наповнюючись водяною парою, бульбашки збільшуються, відриваються від дна й підіймаються. Але дістатися поверхні води їм поки що не вдається: підіймаючись, вони потрапляють у шари менш прогрітої води, і повітря, що міститься в них, знову розчиняється у воді, а водяна пара конденсується, у результаті бульбашки зменшуються і зникають. Унаслідок цього виникає характерний шум.

Якщо продовжувати підігрівати воду, шум через деякий час зменшиться, а потім зміниться настільки ж характерним «бульканням». Зменшення шуму можна пояснити тим, що бульбашки вже не зникають у воді, а досягають її поверхні, тому що весь об'єм води достатньо прогрітий. Булькання ж зумовлено тим, що бульбашки, які спливли на поверхню води, лопаються, а водяна пара виходить з них у повітря. Цей процес інтенсивного **пароутворення в усьому об'ємі рідини** й називають **кипінням** (рис. 27.5).



Рис. 27.4



Рис. 27.5

На відміну від випаровування кипіння відбувається не за будь-якої температури, а за певної, — цю температуру називають *температурою кипіння*. Саме тому й було обрано температуру кипіння води як другу реперну точку шкали Цельсія.

Коли вода закипає, її температура в процесі кипіння залишається сталою. Тому, варячи продукти, після закипання води вогонь зменшують.



На запаленому газовому пальнику стоїть каструля, у якій кипить вода. У каструлі плаває банка з водою. Однак вода в банці не кипить. Чому?

Щоб вода кипіла, мало нагріти її до температури кипіння — треба до неї підводити тепло *під час кипіння*, тому що під час кипіння відбувається інтенсивне пароутворення. Щоб рідина, яка кипить, отримувала тепло, вона мусить перебувати в контакті з тілом, яке має *вищу температуру*, ніж температура кипіння (нагадаємо, що теплообмін відбувається лише між тілами *різної* температури). Саме це і відбувається для води в каструлі: вона контактує з дном, яке нагрівається від полум'я. Однак вода в банці контактує (через стінки банки) з водою, яка кипить в каструлі і має температуру, що *дорівнює* температурі кипіння води. Тому вода, яка кипить, не може передавати воді в банці тепло, необхідне для її кипіння.

У таблиці наведено значення температури кипіння за нормального атмосферного тиску для деяких речовин.

Речовина	$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	Речовина	$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$
Гелій	-269	Вода	100
Водень	-253	Ртуть	357
Хлор	-34	Свинець	1745
Ефір	35	Срібло	2170
Спирт	78	Вольфрам	5700

Зверніть увагу на низькі температури кипіння речовин, які ми звикли вважати газами, — гелію, водню та хлору, а також на високі температури кипіння металів.

Температура кипіння рідини залежить від тиску: *у разі зниження тиску температура кипіння зменшується, а в разі підвищення — збільшується*.

За нормального атмосферного тиску вода кипить за температури 100°C . У горах тиск повітря менший, тому вода кипить там за нижчої температури. Наприклад, на висоті 5 км вода кипить за температури 83°C , а на висоті 7,5 км — за температури 75°C . Альпіністам і гірським жителям добре відомо, що зварити м'ясо в горах — непросте завдання! Знижуючи тиск, можна «примусити» воду закипіти навіть за кімнатної температури (див. розділ «Хочеш дізнатися більше?»)!

Кипіння рідини за підвищеного тиску, а отже, за вищої температури, відбувається, наприклад, у каstrулях-«скороварках». Завдяки спеціальному клапану в таких каstrулях створюється тиск приблизно вдвічі більший за атмосферний, унаслідок чого вода кипить за температури 120°C . Це, здавалось би, невелике збільшення температури кипіння прискорює приготування їжі в декілька разів (з чим і пов'язана назва таких каstrул). Кипіння за підвищеного тиску використовують також для стерилізації медичних інструментів і перев'язувальних матеріалів у автоклавах: виня температура швидше вбиває хвороботворні мікроорганізми.

3. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРООУТВОРЕННЯ

Щоб температура рідини під час пароутворення (випаровування або кипіння) залишалася сталою, необхідно у процесі пароутворення весь час *підводити до рідини тепло*.

? На що витрачається енергія, яку підводять до рідини у процесі пароутворення?

Вона витрачається в основному на **розрив зв'язків між молекулами** під час перетворення рідини на пару. Для «відривання» молекул однієї від одної необхідно виконувати роботу, тому внаслідок перетворення рідини на пару потенціальна енергія взаємодії молекул **збільшується**.

Досліди показують, що кількість теплоти Q , необхідна для того, щоб перетворити рідину на пару за сталої температури, пропорційна масі рідини:

$$Q = Lm.$$

Коефіцієнт пропорційності L називають **питомою теплотою пароутворення**. Якщо відомі передана рідині для перетворення її на пару кількість теплоти Q і маса рідини m , питому теплоту пароутворення можна знайти за формулою $L = \frac{Q}{m}$. Ця формула розкриває **фізичний зміст**

питомої теплоти пароутворення: вона чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати 1 кг рідини, щоб повністю перетворити її на пару за сталої температури. Із цієї формули також випливає, що одиницею питомої теплоти пароутворення є 1 Дж/кг.

Нижче наведено значення питомої теплоти пароутворення для деяких речовин.

Речовина	L , кДж/кг	Речовина	L , кДж/кг
Ртуть	290	Спирт	900
Водень	450	Вода	2300

Зверніть увагу на досить велику питому теплоту пароутворення води.

? Якої маси вантаж можна підняти на 1 м, виконавши роботу, що чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідній для перетворення на пару однієї склянки води (200 мл)?

Для перетворення води масою $m_{\text{в}}$ на пару треба передати воді кількість теплоти $Q = Lm_{\text{в}}$. Піднімаючи вантаж масою $m_{\text{ван}}$ на висоту h , виконують роботу $A = m_{\text{ван}}gh$. Прирівнюючи її до знайденої кількості теплоти, дістаємо $m_{\text{ван}} = \frac{Lm_{\text{в}}}{gh}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові дані, отримаємо $m_{\text{ван}} = \frac{2,3 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{10 \cdot 1} = 4,6 \cdot 10^4 \text{ (кг)} = 46 \text{ (т)}$. Це — маса більш ніж десяти слонів! А йдеться лише про одну склянку води.

Під час конденсації 1 кг пари виділяється така сама кількість теплоти, яку поглинає під час випаровування 1 кг рідини.

? Чому опік паром небезпечніший, ніж опік гарячою водою?

Під час конденсації пари на поверхні шкіри виділяється в декілька разів більша кількість теплоти, ніж під час остигання води від температури кипіння до кімнатної температури.



Чому в місцевостях, розташованих поблизу моря, клімат м'якший, ніж далеко від моря?

Морський клімат м'якший за так званий континентальний (удаліні від моря) з двох причин. По-перше, як ви вже знаєте, завдяки великій питомій теплоємності води вона поглинає велику кількість теплоти під час нагрівання й віддає її під час охолодження. Це зменшує температурні коливання, тобто робить клімат м'якшим. Другою, не менш важливою причиною, є велика питома теплота пароутворення води: у теплу погоду вода, що випаровується з поверхні моря, інтенсивно поглинає тепло, а в холодну, унаслідок конденсації, — віддає. Це також сприяє пом'якшенню клімату. Зменшення температурних перепадів, зумовлене процесами випаровування та конденсації, подібне до зменшення температурних перепадів, зумовленого таненням льоду та замерзанням води.



Хочеш дізнатися більше?

ЧИ МОЖУТЬ ВИПАРОВУВАТИСЯ ТВЕРДІ ТІЛА?

Замерзла на морозі білизна висихає: лід перетворюється на пару, оминаючи рідинний стан (воду). Можна помітити, як із твердого стану в газоподібний перетворюється йод: жовта пляма від йоду поступово світлішає. Лід і йод — не виняток: випаровуються всі тверді тіла, але зазвичай настільки повільно, що ми цього не помічаємо.

ЧИ МОЖЕ ВОДА КИПІТИ ЗА КІМНАТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ?



Проведемо дослід

Закріпимо в штативі тонкостінну колбу з водою, доведемо воду до кипіння і через одну-дві хвилини щільно закоркуємо. Коли вода трохи остигне, акуратно перевернемо колбу (обмотавши руку рушником) і почнемо поливати дно холодною водою. Вода в колбі знову закипить, хоча її температура істотно нижча від 100°C (рис. 27.6).

Пояснення цього дослідіву полягає в тому, що під час кипіння водяна пара витіснила з колби повітря, а під час охолодження пара в колбі сконденсувалася, у результаті чого тиск у колбі різко впав. А за зниженого тиску вода кипить за температури, нижчої від 100°C .

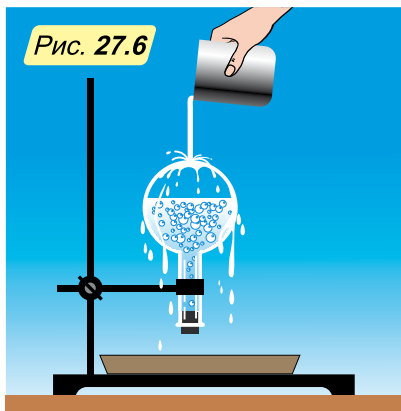


Рис. 27.6



Рис. 27.7

до насоса

Відкачуючи повітря з-під ковпака повітряного насоса, можна примусити воду закипіти навіть за кімнатної температури (рис. 27.7)! А оскільки внаслідок інтенсивного пароутворення вода охолоджується, вона, продовжуючи кипіти, може навіть почати замерзати!

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Що таке пароутворення та конденсація? Наведіть приклади цих явищ.
2. Який вид пароутворення називають випаровуванням?
3. Який фізичний зміст питомої теплоти пароутворення?
4. Виділяється чи поглинається теплота під час конденсації пари?
5. Чому потіння рятує організм від перегрівання?
6. Навіщо дмуть на гарячий чай?
7. Опишіть явище кипіння рідини. Що спільного у випаровування та кипіння й чим вони відрізняються?
8. Чи звариться картопля швидше, якщо збільшити вогонь під кастролю, у якій кипить вода? Обґрунтуйте вашу відповідь.
9. Від чого залежить температура кипіння певної рідини?
10. На плиту поставили повний трилітровий чайник з водою за температури 20°C . Після закипання в чайнику виявилось 2,8 л води. Яку кількість теплоти було передано воді?

1. Перетворення енергії під час роботи теплового двигуна
2. Парова турбіна
3. Реактивний двигун
4. Двигун внутрішнього згоряння
5. Теплові двигуни та захист довкілля

Хочеш дізнатися більше?

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна

1. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС РОБОТИ ТЕПЛООВОГО ДВИГУНА

Ви вже знаєте, які великі «запаси» внутрішньої енергії палива: нагадаємо, що внаслідок згоряння одного літра бензину виділяється близько 30 мільйонів джоулів енергії! Якби хоч три відсотки цієї енергії перетворити в механічну, можна було б підняти слона на висоту десятиповерхового будинку!

Перетворення внутрішньої енергії палива в механічну енергію відбувається в **теплових двигунах**.



Тепловими двигунами називають машини, у яких внутрішня енергія палива частково перетворюється в механічну енергію.

Без теплових двигунів нині неможливо уявити сучасний світ: такі двигуни встановлені на теплових електростанціях, у ракетах, в автомобілях.

Зазвичай у тепловому двигуні **роботу виконує сила тиску нагрітого газу** (пари), **що розширюється**. Цей газ називають **робочим тілом** теплового двигуна. Нагрівають газ за рахунок згоряння палива. Отже, **у тепловому двигуні відбуваються такі перетворення енергії**:

1) під час згоряння палива його внутрішня енергія переходить у внутрішню енергію нагрітого газу (пари);

2) розширюючись, газ виконує роботу — при цьому внутрішня енергія газу частково перетворюється в механічну енергію.

Розгляньмо принципи роботи деяких теплових двигунів.

2. ПАРОВА ТУРБІНА

Проведемо дослід



Закріпимо колбу із зігнутою трубкою над запаленою спиртівкою, а пару, що виходить із трубки, спрямуємо на колесо з лопатями (рис. 28.1). Ударяючи в лопаті колеса, струмінь пари рухає колесо.

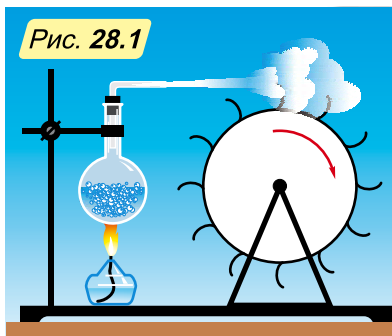


Рис. 28.1



Рис. 28.2

Це — модель **теплового двигуна**: внутрішня енергія палива (спирту) частково перетворюється в механічну енергію колеса. Ми побудували модель **парової турбіни**, запропонованої наприкінці 19-го століття шведським інженером Карлом Лавалем. Саме парові турбіни рухають генератори електричного струму на сучасних теплових електростанціях. Лопаті турбін обертає струмінь перегрітої водяної пари (її тиск у сотні разів перевищує атмосферний, а температура сягає $600\text{ }^{\circ}\text{C}$). Фотографія (рис. 28.2) дає уявлення про розміри сучасних турбін.

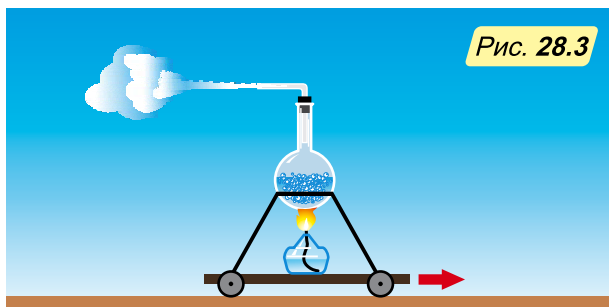
3. РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН

Проведемо дослід



Закріпимо колбу із зігнутою трубкою на візку над спиртівкою (рис. 28.3). Пара, виходячи з трубки, штовхатиме візок.

Ми побудували модель **реактивного двигуна**: візок починає рухатися завдяки тому, що візок і пара, яка виходить із трубки, **відштовхуються** одне від одного.



Наприкінці 19-го століття російський учений Костянтин Ціолковський запропонував використовувати реактивні двигуни в ракетах для космічних польотів. Продукти згоряння палива з величезною швидкістю викидаються із сопла ракети назад. При цьому сама ракета дістає сильний поштовх уперед (рис. 28.4).

В Україні створюють сьогодні відомі в усьому світі потужні ракети, за допомогою яких запускають космічні кораблі та штучні супутники Землі.

Реактивні двигуни встановлюють і на літаки. Найшвидші літаки — саме реактивні.



4. ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У другій половині 19-го століття французький інженер Етьєн Ленуар винайшов *двигун внутрішнього згоряння*. Назву двигуна зумовлено тим, що згоряння палива відбувається *всередині* самого двигуна. Цей двигун удосконалили німецькі інженери Ніколаус Отто і Рудольф Дізель.

Двигуни внутрішнього згоряння набули широкого застосування на транспорті: їх встановлено в автомобілях,

тепловозах, теплоходах, літаках. Рис. 28.5 дуже стисло ілюструє історію автомобілебудування.



Рис. 28.5

На рисунках 28.6–28.9 схематично зображено принцип роботи чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння.

Паливо згоряє всередині циліндра з поршнем. Рух поршня передається валу, а від нього — колесам автомобіля. Щоб зменшити нерівномірність обертання валу, на ньому закріплюють важкий маховик.

Двигун працює **циклічно**, тобто в ньому повторюються одні й ті самі процеси. Кожний цикл відбувається за два оберти валу і складається з чотирьох **тактів**.

1. **Засмоктування** (рис. 28.6). Вал здійснює півоберту, поршень опускається вниз, і через відкритий впускний клапан всмоктується пальна суміш.

2. **Стискання** (рис. 28.7). При закритих клапанах вал здійснює ще півоберту. При цьому поршень стискає пальну суміш у циліндрі, унаслідок чого вона нагрівається.

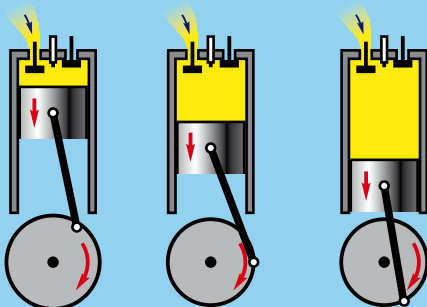
3. **Робочий хід** (рис. 28.8). При закритих клапанах електрична іскра запалює пальну суміш, температура різко зростає й гази, що утворюються під час згоряння, з великою силою штовхають поршень. Саме під час цього такту й відбувається перетворення внутрішньої енергії в механічну: поршень передає енергію валу, який здійснює наступні півоберту. Переданої при цьому енергії вистачає не тільки на те, щоб забезпечити дію двигуна під час трьох «неробочих» тактів, але й на те, щоб рухати автомобіль!

4. **Вихлоп** (рис. 28.9). Роблячи наступні півоберту, вал рухає поршень, який через відкритий випускний клапан виштовхує відпрацьований газ в атмосферу (про забруднення довкілля, спричинене роботою теплових двигунів, ми розповімо далі).

Впускний і випускний клапани відкриваються й закриваються автоматично. Автоматично ж у потрібний момент спалахує іскра. В автомобільних двигунах встановлюють, як правило, декілька циліндрів. Дію їх узгоджують так, щоб під час кожного такту в якомусь із циліндрів здійснювався робочий хід: тоді під час кожного такту вал дістає енергію від одного або декількох циліндрів.

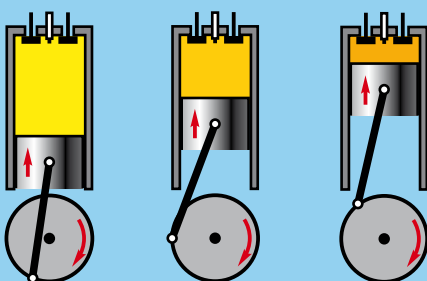
ЗАСМОКТУВАННЯ

Рис. 28.6



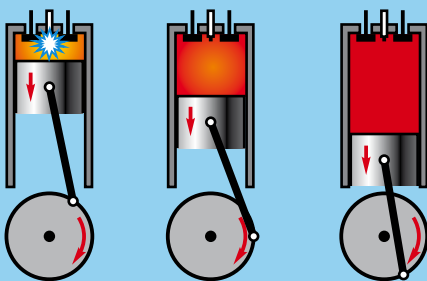
СТИСКАННЯ

Рис. 28.7



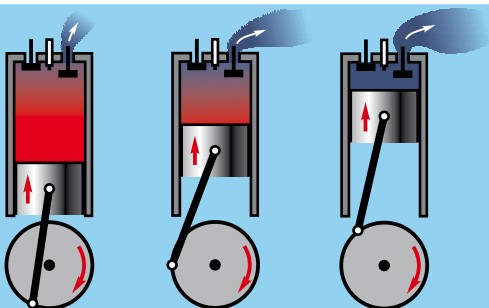
РОБОЧИЙ ХІД

Рис. 28.8



ВИХЛОП

Рис. 28.9



5. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ

Будь-який тепловий двигун може працювати лише за умови, що значна частина енергії, яка виділяється під час згоряння палива, передається довкіллю.

Ось чому в будь-якому автомобілі є *радіатор* — пристрій, призначений охолоджувати двигун (наприклад, зустрічним потоком повітря).

На теплових електростанціях стоять охолоджувальні башти — *градирні* (рис. 28.10). У них унаслідок конденсації пари весь час іде рясний «дощ» (рис. 28.11).



Рис. 28.10



Рис. 28.11

Під час роботи теплових двигунів у довкілля викидають величезні маси продуктів згоряння палива. Деякі з них, зокрема вуглекислий газ, призводять до «парникового ефекту», бо вуглекислий газ не «випускає» в космічний простір теплове проміння нагрітої Сонцем поверхні Землі. Це веде до глобального потепління, що загрожує катастрофічними наслідками. Так, унаслідок танення полярної криги рівень світового океану може піднятися, що призведе до затоплення величезних прибережних територій.

Боротьбу зі шкідливими наслідками роботи теплових двигунів проводять у декількох напрямках.

По-перше, *удосконалюють теплові двигуни*, що дозволяє отримувати ту саму механічну енергію внаслідок згоряння меншої кількості палива.

По-друге, використовують *енергоощадні технології*, завдяки чому споживання енергії на виробництво тієї самої продукції значно зменшується.

По-третє, використовують способи отримання енергії, **які не потребують згоряння палива**. Це, наприклад, атомні електростанції та вітроелектростанції. В останні десятиліття великі сподівання покладають також на термоядерні електростанції, що їх проектують.

Хочеш дізнатися більше?



КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ ТЕПЛООВОГО ДВИГУНА

Ефективність теплового двигуна тим вища, чим більша робота A , виконана двигуном, за тієї самої кількості теплоти Q , що виділилася внаслідок згоряння палива.

Коефіцієнтом корисної дії (ККД) η теплового двигуна називають виражене у відсотках відношення роботи A , виконаної двигуном, до кількості теплоти Q , що виділилася внаслідок згоряння палива: $\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100 \%$.

Із часів появи перших теплових двигунів учені та інженери досягли великих успіхів: якщо ККД перших парових машин становив усього лише близько 1 %, а ККД паровозів — близько 5 %, то ККД сучасних двигунів внутрішнього згоряння досягає 35–40 %. Приблизно таким є і ККД сучасних парових турбін на теплових електростанціях.

Запитання та завдання для самоперевірки



1. Що таке тепловий двигун?
2. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи теплового двигуна?
3. Який принцип роботи реактивного двигуна? Де його використовують?
4. Який принцип роботи парової турбіни? Де її використовують?
5. Який принцип роботи двигуна внутрішнього згоряння? Опишіть стисло кожний із чотирьох тактів роботи двигуна, використовуючи наведені в підручнику схеми.
6. Чи вся енергія, що виділилася внаслідок згоряння палива, перетворюється в механічну під час роботи теплового двигуна?
7. Що роблять для зменшення шкідливих наслідків роботи теплових двигунів?



Головне у цьому розділі

- Суму кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії частинок, з яких складається тіло, називають внутрішньою енергією. Внутрішня енергія тіла залежить від температури тіла, агрегатного стану та хімічного складу.
- Внутрішню енергію тіла можна змінити двома способами: виконавши роботу і шляхом теплообміну (без виконання роботи). Енергію, що її дістає або віддає тіло внаслідок теплообміну, називають кількістю теплоти.
- Вид теплообміну, зумовлений передаванням енергії від одного тіла до другого або від одних частин тіла до інших у результаті теплового руху та взаємодії частинок, називають теплопровідністю. Теплопровідність не спричинює перенесення речовини.
- Вид теплообміну, зумовлений перенесенням речовини — потоками газу або рідини, називають конвекцією.
- Під час теплообміну шляхом випромінювання енергія передається завдяки електромагнітному промінню.
- Різниця температур визначає напрям теплообміну — унаслідок теплообміну внутрішня енергія переходить від тіла з більшою температурою до тіла з меншою температурою.
- Якщо температури тіл однакові, тіла перебувають у тепловій рівновазі.
- Кількість теплоти Q , яку треба передати однорідному тілу для нагрівання його від початкової температури t_n до кінцевої температури t_k , можна знайти за формулою $Q = cm(t_k - t_n)$. Тут m — маса тіла, c — питома теплоємність речовини, з якої складається тіло.
- Кількість теплоти Q , що виділилася внаслідок повного згоряння палива, можна визначити за формулою $Q = qm$, де q — питома теплота згоряння палива, m — маса тіла.
- Перехід речовини з кристалічного стану в рідинний називають плавленням. Температуру, за якої речовина плавиться, називають її температурою плавлення.
- Кількість теплоти Q , необхідну для того, щоб повністю розплавити кристалічне тіло за температури плавлення, мож-

на знайти за формулою $Q = \lambda m$, де λ — питома теплота плавлення, m — маса тіла.

- Перехід речовини з рідинного стану в кристалічний називають кристалізацією, або твердненням. Кристалізація відбувається за тієї самої температури, що і плавлення.
- Перетворення рідини на пару називають пароутворенням, а перетворення пари на рідину — конденсацією. Якщо пароутворення відбувається з вільної поверхні рідини, його називають випаровуванням.
- Під час кипіння пароутворення відбувається не тільки з вільної поверхні рідини, а й усередину бульбашок, які утворюються в усьому об'ємі рідини. За заданого тиску кипіння рідини відбувається за певної температури, яку називають температурою кипіння. У разі зменшення тиску температура кипіння зменшується, а в разі збільшення — збільшується.
- Кількість теплоти Q , необхідну для того, щоб перетворити рідину на пару за сталої температури, можна знайти за формулою $Q = Lm$, де L — питома теплота пароутворення, m — маса рідини.
- Тепловими двигунами називають машини, у яких внутрішня енергія палива частково перетворюється в механічну енергію. У тепловому двигуні відбуваються такі перетворення енергії: 1) під час згоряння палива його внутрішня енергія переходить у внутрішню енергію нагрітого газу (пари); 2) розширюючись, газ виконує роботу — при цьому внутрішня енергія газу частково перетворюється в механічну енергію.
- Під час роботи теплових двигунів значна частина енергії, що виділилася внаслідок згоряння палива, передається довкіллю.
- Боротьбу зі шкідливими наслідками роботи теплових двигунів провадять у таких напрямках: 1) удосконалюють теплові двигуни; 2) використовують енергоощадні технології; 3) використовують джерела енергії, які не потребують згоряння палива.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ¹

1. ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТІЛА

Мета роботи: навчитися вимірювати швидкість тіла під час рівномірного руху.

Обладнання: металева кулька, жолоб, секундомір, лінійка, простий олівець, гумка, метроном², відрегульований на проміжок часу³ 1 с між послідовними ударами.

ХІД РОБОТИ

1. Установіть жолоб під малим кутом до горизонту, підклавши під один його кінець тонку книгу або зошит.

2. Покладіть металеву кульку на вищий кінець жолоба і в момент удару метронома злегка штовхніть кульку.

3. Відмітьте олівцем на жолобі положення кульки через 1, 2 та 3 секунди після початку руху. Вимірте лінійкою шляхи, пройдені за кожну секунду, обчисліть середню швидкість за кожний із цих проміжків часу й заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

Час руху	Пройдений шлях, см	Середня швидкість, см/с
Перша секунда		
Друга секунда		
Третя секунда		

Якщо знайдені значення середньої швидкості приблизно однакові, то рух кульки наближено можна вважати рівномірним. Якщо ж ці значення істотно відрізняються, змініть (зробивши декілька спроб) нахил жолоба так, щоб досягти наближено рівномірного руху кульки, і заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

¹ До складу навчально-методичного комплексу «Фізика-8» входить зошит для лабораторних робіт, за допомогою якого вам буде зручніше виконувати ці роботи й робити записи. Похибки вимірів і методи їхнього обчислювання буде розглянуто в курсі фізики старших класів. Розділ «Лабораторні роботи» написано разом з Л. А. Кириком.

² Метроном установлено на столі вчителя, один на клас.

³ На розсуд учителя цей проміжок часу може бути змінено.

Час руху	Пройдений шлях, см	Середня швидкість, см/с
Перша секунда		
Друга секунда		
Третя секунда		

4. Зробіть висновок: як рухалася кулька в проведених вами дослідах.

2. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ТІЛА¹

Мета роботи: вимірити частоту обертання тіла під час його руху по колу.

Обладнання: невеликий тягарець на нитці, аркуш паперу з накресленим на ньому колом діаметром 20 см, лінійка з поділками, годинник із секундною стрілкою.

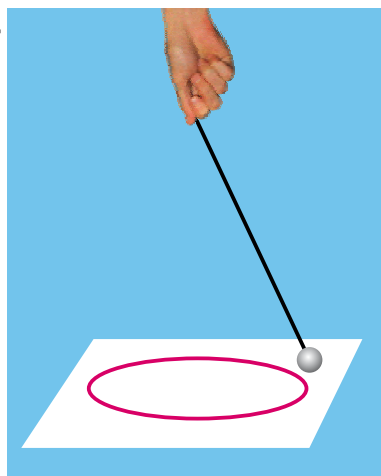
ХІД РОБОТИ

1. Зробіть на нитці вузлик на відстані приблизно 30–40 см від кінця нитки, прикріпленої до тягарця.

2. Візьміть нитку за вузлик і розкрутіть тягарець так, щоб він рухався по колу в горизонтальній площині (див. рисунок). Постарайтеся, щоб радіус цього кола приблизно збігався з радіусом накресленого кола.

3. Вимірте час, протягом якого тягарець зробить 10 повних обертів.

4. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:



Число обертів	Проміжок часу, с	Період, с	Частота, $\frac{1}{с}$

¹ Цю лабораторну роботу можна виконувати вдома.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ МАЯТНИКІВ¹

Мета роботи: дослідити, від яких величин залежать періоди коливань нитяного та пружинного маятників.

Обладнання: штатив із муфтою та кільцем, кулька на нитці, секундомір або годинник із секундною стрілкою, вимірвальна стрічка, лінійка з поділками, 4 тягарці масою по 0,1 кг, пружина.

ХІД РОБОТИ

1. Вивчіть залежність періоду коливань нитяного маятника від маси вантажу. Установіть штатив на краю стола, закріпіть у штативі за допомогою муфти кільце й підвісьте до нього на нитці завдовжки 1 м тягарець так, щоб він не торкався підлоги.

2. Відхиліть тягарець на 10–15 см від положення рівноваги, відпустіть його й вимірте час t , протягом якого маятник здійснює 20 повних коливань. Обчисліть за цими даними період коливань нитяного маятника.

3. Повторіть дослід, підвісивши до нитки два тягарці.

4. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

№ досліду	Маса вантажу, кг	Кількість коливань	Проміжок часу t , с	Період коливань T , с
1	0,1	20		
2	0,2	20		

5. На підставі проведених дослідів зробіть висновок про характер залежності періоду коливань нитяного маятника від маси вантажу і запишіть його в зошит для лабораторних робіт.

6. Вивчіть залежність періоду коливань нитяного маятника від довжини нитки. Підвісьте кульку на нитці завдовжки 10 см, відхиліть на декілька сантиметрів від положення рівноваги й відпустіть. Вимірте час t , протягом якого маятник здійснює 10 повних коливань. Обчисліть за цими даними період коливань нитяного маятника.

7. Повторіть дослід, збільшивши довжину нитки в 4 рази і в 9 разів (тобто з довжиною нитки 40 см і 90 см).

8. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

¹ Цю лабораторну роботу розраховано на весь урок.

№ до- сліду	Довжина нитки, см	Кількість коливань	Проміжок часу t , с	Період ко- ливань T , с
1	10	10		
2	40	10		
3	90	10		

9. На підставі проведених дослідів зробіть якісний висновок про характер залежності періоду коливань нитяного маятника від довжини нитки й запишіть його в зошит для лабораторних робіт.

10. Вивчіть залежність періоду коливань пружинного маятника від маси вантажу. Підвісьте на пружині один тягарець і, відхиливши його від положення рівноваги на декілька сантиметрів, вимірте час t , протягом якого маятник здійснює 20 повних коливань. Обчисліть за цими даними період коливань маятника.

11. Повторіть дослід, збільшивши масу вантажу у 2 рази і в 4 рази (тобто взявши 2 і 4 тягарці).

12. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

№ до- сліду	Маса ван- тажу, кг	Кількість коливань	Проміжок часу t , с	Період ко- ливань T , с
1	0,1	20		
2	0,2	20		
3	0,4	20		

13. На підставі проведених дослідів зробіть якісний висновок про характер залежності періоду коливань пружинного маятника від маси вантажу й запишіть його в зошит для лабораторних робіт.

14. Проаналізувавши одержані результати, зробіть висновки: що спільного в коливаннях нитяного та пружинного маятників і чим вони відрізняються. Запишіть ваші висновки в зошит для лабораторних робіт.

4. ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКУ¹

Мета роботи: дослідити, від чого залежать гучність і висота звуку.

¹ Цю лабораторну роботу можна виконувати вдома.

Обладнання: міцна нитка або волосінь завдовжки близько 1 м, гребінець.

ХІД РОБОТИ

1. Туго натягніть нитку: один її кінець прив'яжіть (до батареї опалення, дверної ручки, ніжки стола), а інший тримайте в руці. Ущипніть нитку — ви почуєте звук, як від натягнутої струни. Джерелом цього звуку є нитка, що коливається.

2. Переконайтеся, що зі збільшенням амплітуди коливань нитки звук стає гучнішим.

3. Зменшіть довжину нитки. Ви помітите, що звук став вищим. У разі зменшення довжини нитки (за тієї самої сили натягу) збільшується частота коливань нитки.

4. Зробіть висновки про те, як залежать гучність і висота звуку від амплітуди та частоти коливань. Запишіть ваші висновки в зошит для лабораторних робіт.

5. Якщо у вас є гітара або скрипка, проведіть аналогічні дослідження, використовуючи струни інструмента, і запишіть ваші висновки в зошит для лабораторних робіт.

6. Швидко проведіть яким-небудь твердим предметом по зубцях гребінця (поблизу їх основ). Ви почуєте звук, який виникає внаслідок послідовних ударів об зубці. Що швидше ви проводите по зубцях, то вища частота цього звуку. Поясніть, із чим це пов'язано, і запишіть ваше пояснення в зошит для лабораторних робіт.

5. КОНСТРУЮВАННЯ ДИНАМОМЕТРА

Мета роботи: сконструювати динамометр.

Обладнання: динамометр, шкалу якого закрито папером, набір тягарців по 100 г, штатив із муфтою та лапкою, лінійка.

ХІД РОБОТИ

1. Закріпіть динамометр із закритою шкалою вертикально в лапці штатива. Відмітьте горизонтальною рисою початкове положення покажчика динамометра й поставте цифру 0.

2. Підвісьте до динамометра один тягарець і плавно відпустіть. Зачекайте, поки тягарець зупиниться в положенні рівноваги, відмітьте на папері нове положення покажчика

динамометра й поставте цифру 1 (нагадаємо: вага тягарця масою 100 г дорівнює приблизно 1 Н).

3. Повторіть дослід, підвішуючи до динамометра 2, 3 і 4 тягарці. Щоразу відмічайте на папері положення покажчика динамометра й ставте цифри 2, 3, 4.

4. Зніміть тягарці з динамометра, а потім зніміть динамометр зі штатива. Вимірте лінійкою відстані між сусідніми відміченими вами поділками. Якщо ви вимірили досить точно, ці відстані мають бути приблизно однаковими. Якщо це виявилось не так, повторіть пункти 1–3.

5. Поділіть відстань між кожними сусідніми мітками на 10 рівних частин, використовуючи лінійку.

6. ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМОМЕТРА¹

Мета роботи: зважити тіла динамометром.

Обладнання: динамометр, 3 тіла невідомої маси.

ХІД РОБОТИ

1. Вимірте за допомогою динамометра вагу запропонованих вам тіл.

2. Вимірявши вагу кожного тіла, обчисліть їхні маси.

3. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

Найменування тіла	Вага тіла, Н	Маса тіла, кг

7. ГІДРОСТАТИЧНЕ ЗВАЖУВАННЯ

Мета роботи: вимірити густину речовини, з якої складається тверде тіло, методом гідростатичного зважування.

Обладнання: динамометр, 3 тіла невідомої густини, посудина з водою, штатив.

¹ На проведення цієї лабораторної роботи потрібно 10–15 хвилин. Можна також об'єднати цю роботу з наступною.

ХІД РОБОТИ

1. Закріпіть динамометр у штативі, зважте за допомогою динамометра одне із запропонованих вам тіл і запишіть його вагу P .

2. Піднесіть до тіла знизу посудину з водою так, щоб тіло занурилось у воду повністю. Запишіть покази динамометра P' для цього випадку.

3. Використовуючи виведену в підручнику формулу $\rho = \rho_v \frac{P}{P - P'}$ для визначення густини тіла за допомогою гідростатичного зважування, визначте густину тіла ρ .
Уважайте, що густина води ρ_v дорівнює $10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

4. Повторіть дослід для решти тіл.

5. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

Найменування тіла	$P, \text{Н}$	$P', \text{Н}$	Густина тіла, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

6. Порівняйте одержані значення густини з табличними значеннями густини й установіть, з яких речовин можуть складатися запропоновані вам тіла.

8. ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

Мета роботи: вимірити коефіцієнт тертя ковзання дерева по дереву.

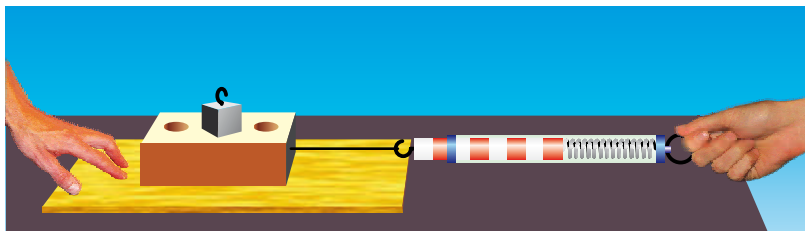
Обладнання: дерев'яний брусок, дерев'яна дошка або лінійка, набір тягарців відомої маси, динамометр.

ХІД РОБОТИ

1. Вимірте динамометром вагу бруска й запишіть у зошиті для лабораторних робіт.

2. Покладіть брусок на горизонтально розташовану дерев'яну лінійку. На брусок поставте тягарець.

3. Тягніть брусок рівномірно по горизонтальній дошці або лінійці, як показано на рисунку нижче. Запишіть покази динамометра. Повторіть дослід, поставивши на брусок 2 і 3 тягарці.



4. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

Кількість тягарців	Сила нормального тиску N , Н	Сила тертя $F_{\text{тер}}$, Н
1		
2		
3		

5. Накресліть у зошиті для лабораторних робіт осі координат N і $F_{\text{тр}}$, виберіть зручний масштаб і нанесіть одержані вами 3 експериментальні точки.

6. Якщо ви вимірили досить точно, одержані експериментальні точки мають бути розташовані поблизу однієї прямої, що проходить через початок координат. Це вказує на те, що сила тертя ковзання прямо пропорційна силі нормального тиску. Проведіть цю пряму.

7. Візьміть на проведеній прямій точку, розташовану не дуже близько до початку координат, і знайдіть значення $F_{\text{тр}}$ та N , що відповідають цій точці. За відношенням цих значень визначте коефіцієнт тертя ковзання дерева по дереву. Обчислення та результат запишіть у зошит для лабораторних робіт.

9. ВИВЧЕННЯ УМОВИ РІВНОВАГИ ВАЖЕЛЯ

Мета роботи: перевірити на досліді умову рівноваги важеля.

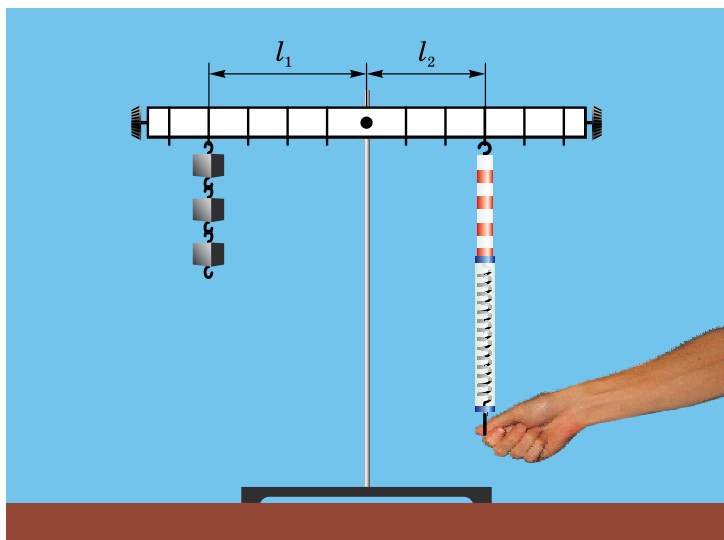
Обладнання: штатив із муфтою, важіль, набір тягарців¹, динамометр, лінійка з міліметровими поділками.

ХІД РОБОТИ

1. Установіть важіль на штативі та врівноважте його в горизонтальному положенні за допомогою регулювальних гайок на кінцях.

¹ Уважайте, що вага кожного тягарця масою 100 г дорівнює 1 Н.

2. Утримуючи рукою важіль у горизонтальному положенні, підвісьте до нього на деякій відстані від осі «гірлянду» тягарців загальною вагою P , як показано на рисунку.



Apago PDF Enhancer

3. Урівноважте важіль, прикладаючи до нього за допомогою динамометра вертикально напрямлену силу, як показано на рисунку. Вимірте модуль цієї сили F .

4. Визначте за допомогою поділок на важелі плечі сил l_1 і l_2 (див. рисунок).

5. Повторіть дослід ще двічі, змінюючи положення точок підвісу тягарців і їх загальну вагу.

6. Зробіть у зошиті для лабораторних робіт схематичні рисунки дослідів. На рисунках укажіть прикладені до важеля сили та плече кожної з них. Обчисліть моменти M_1 і M_2 сил, які обертають важіль відповідно проти годинникової стрілки та за годинниковою стрілкою.

7. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

P , Н	l_1 , м	M_1 , Н·м	F , Н	l_2 , м	M_2 , Н·м

8. Порівняйте значення моментів M_1 і M_2 сил, які обертають важіль у протилежних напрямках, і зробіть висновок. Зроблений вами висновок запишіть у зошит для лабораторних робіт.

10. ВИЗНАЧЕННЯ ККД ПОХИЛОЇ ПЛОЩИНИ

Мета роботи: знайти на досліді ККД похилої площини.

Обладнання: дерев'яна дошка, дерев'яний брусок, динамометр, лінійка, штатив.

ХІД РОБОТИ

1. Закріпіть дошку під невеликим кутом у штативі, вимірте висоту h і довжину l похилої площини.

2. Покладіть брусок на похилу площину. Прикріпіть до бруска динамометр, рівномірно тягніть за його допомогою брусок по похилій площині вгору. Запишіть покази динамометра F .

3. Вимірте за допомогою динамометра силу тяжіння mg , яка діє на брусок.

4. Обчисліть виконану роботу $A_{\text{вик}}$ у разі підняття тіла по похилій площині та корисну роботу $A_{\text{кор}}$ у разі підняття тіла вертикально і, виходячи з одержаних результатів, знайдіть ККД похилої площини за заданим кутом її нахилу.

5. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

l , м	h , м	mg , Н	F , Н	$A_{\text{кор}}$, Дж	$A_{\text{вик}}$, Дж	η (%)

6. Дослідіть одержані результати і дайте відповідь на запитання: чи дає похила площина вигреш у силі? у роботі? Зроблені вами висновки запишіть у зошит для лабораторних робіт.

11. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИХ ТЕРМОМЕТРІВ

Мета роботи: вимірити температуру тіла за допомогою різних термометрів.

Обладнання: 2 рідинні (спиртові) лабораторні термометри, посудина з теплою¹ водою.

ХІД РОБОТИ

1. Визначте ціну поділки кожного із запропонованих вам термометрів і межі вимірів температури цими термометрами. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

Найменування термометра	Нижня межа вимірів	Верхня межа вимірів	Ціна поділки

2. Опустіть лабораторні термометри у посудину з теплою водою та зачекайте, поки їхні покази перестануть змінюватися. Не виймаючи термометрів з води, визначте їхні покази. Результати запишіть у зошит для лабораторних робіт. Зроблений вами висновок запишіть у зошит для лабораторних робіт.

Apago PDF Enhancer

12. ВИВЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ ПРИ ЗМІШУВАННІ ВОДИ РІЗНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Мета роботи: перевірити на досліді справедливність рівняння теплового балансу в разі змішування води різної температури.

Обладнання: калориметр, термометр лабораторний, вимірювальний циліндр (мензурка), склянка, посудини з прохолодною та теплою водою.

ХІД РОБОТИ

1. Використовуючи вимірювальний циліндр, налейте в склянку прохолодну воду масою m_1 . Вимірте її температуру t_1 .

2. Використовуючи вимірювальний циліндр, налейте в калориметр теплу воду масою m_2 . Вимірте її температуру t_2 .

¹ Температура води в цій і наступних лабораторних роботах повинна не перевищувати 60 °С.

3. Додайте до калориметра воду зі склянки і після встановлення теплової рівноваги вимірте температуру суміші t .

4. Заповніть у зошиті для лабораторних робіт таблицю:

m_1 , кг	t_1 , °C	m_2 , кг	t_2 , °C	t , °C

5. Обчисліть кількість теплоти Q_1 , яку дістала прохолодна вода: $Q_1 = cm_1(t - t_1)$.

6. Обчисліть кількість теплоти Q_2 , яку віддала тепла вода: $Q_2 = cm_2(t_2 - t)$.

7. Порівняйте Q_1 і Q_2 . Зроблений вами висновок запишіть у зошит для лабораторних робіт.

13. ВИЗНАЧЕННЯ ККД НАГРІВАЧА

Мета роботи: знайти на досліді ККД нагрівача.

Обладнання: штатив із лапкою та тримачем, термометр, металевий стакан від калориметра, частина таблетки сухого пального, терези з набором важків, вимірювальний циліндр (мензурка), посудина з водою, тигель для спалювання сухого пального, сірники.

ХІД РОБОТИ

1. Закріпіть у штативі стакан із водою на такій висоті, щоб воду можна було підігрівати за допомогою сухого пального.

2. Використовуючи вимірювальний циліндр, налейте в стакан певний об'єм води (150–200 мл). Обчисліть масу води та вимірте її температуру.

3. За допомогою зважування визначте масу запропонованої вам частини таблетки сухого пального.

4. Під стакан підставте тигель із сухим паливом і підпаліть його.

5. Підігрівайте воду, час від часу вимірюючи її температуру, доки температура води стане рівною 60 °C. Після цього загасіть сухе паливо способом, який запропонує вчитель.

6. Зачекайте декілька хвилин, поки сухе пальне охолоне, і за допомогою зважування визначте масу решти сухого пального.

7. За одержаними даними визначте ККД нагрівача, використовуючи формулу, наведену в підручнику. Уважайте, що питома теплота згоряння сухого пального дорівнює 18 МДж/кг.

8. Виміри та результати обчислень запишіть у зошит для лабораторних робіт.

9. Запишіть у зошит для лабораторних робіт ваше припущення про те, чому знайдений на досліді ККД нагрівача істотно менший від 100 %.

14. ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ РЕЧОВИНИ

Мета роботи: навчитися визначати питому теплоємність речовини калориметричним способом.

Обладнання: склянка з водою, калориметр, термометр, терези з набором важків, вимірювальний циліндр (мензурка), металевий циліндр на нитці, посудина (одна на клас) з металевими циліндрами та льодом, що тане¹.

ХІД РОБОТИ

1. Відмірте за допомогою вимірювального циліндра 100 мл води, налейте її в калориметр і вимірте її температуру t_b .

2. Опустіть у калориметр металевий циліндр, вийнятий із посудини з льодом.

3. Зачекайте кілька хвилин, щоб установилася теплова рівновага в калориметрі, і вимірте температуру води в калориметрі t_k .

4. Обітріть циліндр і вимірте його масу m_m .

5. Обчисліть питому теплоємність c_m металу, з якого виготовлено циліндр (уважаючи, що теплообміном з навколишнім середовищем можна знехтувати), за формулою:

¹ Лід можна замовити у шкільній їдальні.

$$c_{\text{М}} = \frac{c_{\text{В}} m_{\text{В}} (t_{\text{В}} - t_{\text{К}})}{m_{\text{М}} (t_{\text{К}} - t_{\text{М}})},$$

де $c_{\text{В}}$ і $m_{\text{В}}$ — питома теплоємність і маса води, $t_{\text{В}}$ і $t_{\text{М}}$ — початкові температури води та металевого циліндра (0°C), $t_{\text{К}}$ — їхня спільна кінцева температура.

6. Використовуючи знайдене на досліді значення питомої теплоємності металу, визначте за допомогою таблиці питомих теплоємностей, який це може бути метал або сплав.

ВІДПОВІДІ

§ 1. 5. Ні. 7. 20 км.

§ 2. 5. У 6 разів. 6. Людина. 7. Майже 28 метрів. 8. За одну хвилину.

9. 1) одну годину зі швидкістю $20 \frac{\text{км}}{\text{год}}$; 2) 2 год; 5) мабуть, ні;

4) 4 год зі швидкістю $5 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. 10. Змогла б.

§ 3. 3. $80 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. 4. $75 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

§ 4. 4. $0,015 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$; $0,175 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$; $1 \frac{\text{см}}{\text{с}}$. 5. На захід зі швидкістю

$1670 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. 6. Близько $30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. 8. 15,3 км.

§ 5. 3. 0,2 с; 5 Гц. 6. 2 рази. 7. 0,75 с. 8. 0,25 Гц.

§ 6. 5. Приблизно 3,4 км. 8. Комар махає крильцями найчастіше. 11. Приблизно 4,5 км.

§ 7. 7. Унаслідок надто різкого гальмування можна перелетіти через руль. 8. Якщо різко стиснути за нижню нитку, вона й порветься, оскільки внаслідок інертності куля майже не зрушить під час ривка і тому натяг верхньої нитки залишиться майже таким, яким він був, коли куля висіла; якщо ж плавно потягти за нижню нитку, порветься верхня нитка, бо в цьому випадку її сила натягу перевищує силу натягу нижньої нитки на вагу кулі. 9. $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

§ 8. 8. $100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. 9. 2 мм. 12. Можуть. 0; 2 Н; 4 Н; 6 Н.

§ 10. 8. Коли брусок перебуває в спокої, на нього діє сила тертя спокою. 11. 0,3.

§ 12. 2. Збільшиться вдвічі; зменшиться, оскільки людина впаде і тоді площа її дотику з підлогою значно збільшиться. 7. Неправильно зображено лівий кавник: його не можна наповнити доверху.

§ 13. 8. Відношення площин поршнів.

§ 14. 8. Сила тиску атмосфери на кожну півкулю дорівнювала приблизно 10^4 Н.

§ 15. 5. Ні. 6. Переважить золота куля, бо для неї виштовхувальна сила менша. 7. Виштовхувальна сила для алюмінієвої кулі в 3,3 раза більша, ніж для мідної.

- § 16.** 2. Наприклад, із золота чи платини. 3. Середня густина тіла людини трохи менша від густини води. 5. $200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
- § 18.** 10. У процесі падіння частина механічної енергії перетворюється у внутрішню енергію: вантаж та повітря нагріваються. 11. $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
тобто $72 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.
- § 19.** 5. 270 Н. 6. 1500 Н. 7. 83 %. 8. $5 \cdot 10^3$ Н.
- § 20.** 1. Колесо перебуватиме в рівновазі, коли один з молоточків буде на одній вертикалі з віссю колеса (під віссю). 2. Ланцюг перебуватиме в рівновазі, при цьому вага правої частини ланцюга частково припадає на друге та третє зверху колеса.
- § 21.** 6. Для правильної відповіді треба враховувати опір повітря. Механічна енергія каменя під час падіння зменшується, а внутрішня — збільшується (камінь нагрівається).
- § 22.** 10. Унаслідок конвекції.
- § 23.** 8. Тому, що зображено справа.
- § 24.** 6. 12 л. 7. 27°C .
- § 25.** 3. Зможуть. 4. Приблизно 160 т.
- § 26.** 6. Алюмінієвої.
- § 27.** 10. 1,47 МДж.

ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

- Агрегатні стани речовини 208
Амплітуда коливань 33
Антициклон 122
Арістотель 56, 70
Архімед 86, 123, 128, 129, 160
Атмосфера 113
Атмосферний тиск 114
Барометри 117
Батискаф 104
Блек Джозеф 212
Блок нерухомий 90, 94
Блок рухомий 91
Бриз денний 188
Бриз нічний 188
Броун Роберт 177
Бруно Джордано 10
Бхаскарі 168
Вага 74
Важіль 85
Вантажопідйомність судна 134
Ват 164
Ватерлінія 134
Ватт Джеймс 164
Векторні величини 9
Взаємодія тіл 54
Випаровування 216
Випромінювання 190
Висота звуку 46
Висотоміри 120
Відбиття звуку 47
Відносність руху 5
Вітроелектростанції 231
«Вічний двигун» 167
Внутрішня енергія 178
Водогін 103
Водотоннажність 134
Геліоцентрична система світу 10
Гельмгольц Герман 156, 158
Геоцентрична система світу 10
Гідравлічний прес 109
Гідростатичне зважування 127
Графіки залежності швидкості від часу 18
Графіки залежності шляху від часу 16
Гук Роберт 65
Гучність звуку 46
Гюйгенс Христіан 36
Галілей Галілео 6, 11, 36, 57, 71, 160
Геріке Отто 121
Двигун внутрішнього згоряння 226
Двигун реактивний 225
Двигуни теплові 224
Деформація 55
Джерела звуку 41
Джоуль — одиниця роботи та енергії 144
Джоуль Джеймс 144, 156, 158, 178
Динамометр 66
Дирижаблі 136
Добове обертання Землі 5, 30
Додавання сил 66
Дослід Торрічеллі 116
Електростанції атомні 231
Енергія 152
Енергія кінетична 154
Енергія механічна 153
Енергія потенціальна 153
Енергія потенціальна піднятого вантажу 154
Енергоощадні технології 230
Ехолот 48
Жорсткість пружини 65
Закон Архімеда 125
Закон Гука 65
Закон збереження енергії 156
Закон збереження механічної енергії 156
Закон інерції 56
Закон Паскаля 109
Закон сполучених посудин 100
Захист довкілля 230
Зважування 75
Звук 41
Змінення агрегатного стану речовини 180
«Золоте правило» механіки 160
Інертність 59
Інфразвук 49
Калориметр 199
Кипіння 218
Кількість теплоти 184
Клімат континентальний 202
Клімат морський 202
Коефіцієнт корисної дії 161
Коефіцієнт корисної дії нагрівача 206
Коефіцієнт тертя 80
Конвекція 187
Конвекція примусова 189
Конвекція природна 188
Конденсація 216
Коперник Микола 10
Кристалізація 213
Кристалічні ґратки 209
Леонардо да Вінчі 169, 170, 171
Магдебурзькі півкулі 121
Майєр Роберт 157, 158, 171
Манометри 109
Маса 59
Маятник математичний 35

Маятник пружинний 38
 Механічний рух 4
 Механічні коливання 34
 Момент сили 90
Насоси 110
 Невагомість 75
 Ньютон — одиниця сили 64
Ньютон Ісак 73
Осадка 134
Падіння вільне 72
 Падіння тіл 70
 Парова турбіна 225
 Пароутворення 216
 Паскаль — одиниця тиску 97
Паскаль Блез 97, 109
 Переміщення 9
 Період коливач 34
 Період обертання 29
 Питома теплоємність 198
 Питома теплота згоряння палива 204
 Питома теплота пароутворення 220
 Питома теплота плавлення 210
 Плавання суден 134
 Плавання тіл 132
 Плавлення 208
 Повітроплавання 135
 Повітряні кулі 135
Понселе Віктор 143
 Потужність 163
 Похила площина 92
 Поширення звуку 43
 Правило моментів 90
 Приймачі звуку 45
 Прискорення вільного падіння 74
Рівновага тепла 192
 Рівнодійна 66
 Рівняння теплового балансу 200
 Робота механічна 143
 Робота сили пружності 148
 Робота сили тертя ковзання та кочення 149
 Робота сили тяжіння 148
 Робоче тіло теплового двигуна 224
 Рух броунівський 177
 Рух криволінійний 7
 Рух Місяця 5
 Рух Місяця навколо Землі 30
 Рух нерівномірний 21
 Рух обертальний 30
 Рух планет 5
 Рух по колу 7
 Рух прямолінійний 7
 Рух прямолінійний нерівномірний 22
 Рух прямолінійний рівномірний 13
 Рух рівномірний по колу 27
Саді Корно 176
 Сила Архімеда 123
 Сила виштовхувальна 123
 Сила нормальної реакції 63
 Сила пружності 63, 64
 Сила тертя 62, 63
 Сила тертя ковзання 78
 Сила тертя кочення 82
 Сила тертя спокою 81
 Сила тяжіння 62, 73
 Сили 62
 Сполучені посудини 100
Стевін Сімон 171
Тембр звуку 46
 Температура 192
 Температура кипіння 219
 Температура найнижча 196
 Температура плавлення 209
 Теплоізоляція 187
 Теплообмін 185
 Теплопровідність 186
 Термометри біметалеві 194
 Термометри рідинні 194
 Тиск 95
 Тиск атмосферний 99
 Тиск газу 106
 Тиск рідин 97
 Тіла аморфні 210
Торрічеллі Еванджеліста 114
 Траєкторія 7
 Траєкторія замкнена 8
 Ультразвук 48
 Умови рівноваги важеля 86
Хвилі 44
 Хвилі поздовжні 44
 Хвилі поперечні 44
 Хімічні реакції 180
Циклон 122
Частота коливач 34
 Частота обертова 29
Швидкість звуку 45
 Швидкість миттєва 25
 Швидкість прямолінійного рівномірного руху 14
 Швидкість середня 22
 Шкала Цельсія 196
 Шлюзи 102
 Шлях 9
Явище інерції 58

ЗМІСТ

ДО ВЧИТЕЛЯ ТА УЧНЯ	3
--------------------------	---

МЕХАНІЧНІ ЯВИЩА

РОЗДІЛ 1. МЕХАНІЧНИЙ РУХ

§ 1. МЕХАНІЧНИЙ РУХ. ТРАЄКТОРІЯ, ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ	5
1. Відносність руху	5
2. Траєкторія	7
3. Шлях	9
4. Переміщення	9
§ 2. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОМІРНИЙ РУХ	13
1. Прямолінійний рівномірний рух	13
2. Швидкість прямолінійного рівномірного руху	14
3. Одиниці швидкості	14
4. Чим допомагають формули?	15
5. Графіки прямолінійного рівномірного руху	16
§ 3. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ	21
1. Нерівномірний рух	21
2. Середня швидкість нерівномірного руху	22
3. Миттєва швидкість	25
§ 4. РУХ ПО КОЛУ. ОБЕРТАЛЬНИЙ РУХ	27
1. Рівномірний рух по колу	27
2. Період обертання і обертова частота	29
3. Рух місяця навколо Землі	30
4. Обертальний рух	30
§ 5. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ	33
1. Коливальний рух. Амплітуда, період і частота коливань	33
2. Математичний маятник	35
3. Пружинний маятник	38
§ 6. ЗВУК	41
1. Джерела звуку	41
2. Поширення звуку	43
3. Гучність, висота й тембр звуку	46
4. Відбиття звуку	47
5. Нечутні звуки	48

РОЗДІЛ 2. ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ

§ 7. ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ	54
1. Як виявляє себе взаємодія тіл?	54
2. Закон інерції	56
3. Маса	58

§ 8. ВЗАЄМОДІЇ ТА СИЛИ. СИЛИ ПРУЖНОСТІ	62
1. Взаємодії та сили.....	62
2. Сили пружності.....	64
3. Закон Гука.....	65
4. Додавання сил.....	66
§ 9. СИЛА ТЯЖІННЯ. ВАГА Й НЕВАГОМІСТЬ	70
1. Падіння тіл.....	70
2. Сила тяжіння.....	73
3. Вага.....	74
4. Невагомість	75
§ 10. СИЛИ ТЕРТЯ	78
1. Сила тертя ковзання.....	78
2. Сила тертя спокою.....	81
3. Сила тертя кочення.....	82
§ 11. МОМЕНТ СИЛИ. ВАЖІЛЬ І БЛОК.....	85
1. Важіль.....	85
2. Момент сили. Правило моментів	90
3. Блоки.....	90
4. Похила площина.....	92
§ 12. ТИСК ТВЕРДИХ ТІЛ І РІДИН	95
1. Тиск, здійснюваний твердими тілами	95
2. Одиниці тиску.....	97
3. Тиск рідин	97
4. Сполучені посудини.....	100
§ 13. ТИСК ГАЗІВ. ЗАКОН ПАСКАЛЯ ДЛЯ РІДИН І ГАЗІВ.....	106
1. Тиск газу	106
2. Закон Паскаля.....	108
3. Гідравлічний прес	109
4. Насоси.....	110
§ 14. АТМОСФЕРНИЙ ТИСК	113
1. Атмосфера Землі.....	113
2. Дослід Торрічеллі.....	116
3. Залежність атмосферного тиску від висоти	119
§ 15. ВИШТОВХУВАЛЬНА СИЛА. ЗАКОН АРХІМЕДА	123
1. Виштовхувальна сила.....	123
2. Закон Архімеда.....	125
3. Гідростатичне зважування	127
§ 16. ПЛАВАННЯ ТІЛ	132
1. Плавання однорідних тіл.....	132
2. Плавання суден.....	134
3. Повітроплавання	135

РОЗДІЛ 3. РОБОТА ТА ЕНЕРГІЯ

§ 17. МЕХАНІЧНА РОБОТА	143
1. Механічна робота	143
2. Коли робота дорівнює нулю?.....	146
3. Робота різних сил	148

§ 18. ЕНЕРГІЯ	152
1. Енергія	152
2. Механічна енергія.....	153
3. Коли зберігається механічна енергія?.....	155
4. Закон збереження енергії	156
§ 19. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ. ПОТУЖНІСТЬ	160
1. «Золоте правило» механіки та закон збереження енергії	160
2. Коефіцієнт корисної дії.....	161
3. Потужність	163
§ 20. ВІД ВЕЛИКОЇ ОМАНИ ДО ВЕЛИКОГО ВІДКРИТТЯ	167
1. Чому спроби побудувати вічний двигун були такими впертими?	167
2. Загадки й розгадки «вічних двигунів».....	168
3. Користь від пошуку вічних двигунів усе-таки була!	171

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

РОЗДІЛ 4. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

§ 21. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ	176
1. Перетворення енергії внаслідок нагрівання тертям	176
2. Перетворення енергії внаслідок стискання та розширення газу	181
§ 22. ТЕПЛООБМІН	184
1. Кількість теплоти.....	184
2. Види теплообміну.....	185
§ 23. ТЕПЛОВА РІВНОВАГА. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	192
1. Теплова рівновага і температура.....	192
2. Вимірювання температури	193
§ 24. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ	198
1. Питома теплоємність	198
2. Вимірювання питомої теплоємності.....	199
§ 25. ЕНЕРГІЯ ПАЛИВА.....	204
1. Питома теплота згоряння.....	204
2. Коефіцієнт корисної дії нагрівача.....	206
§ 26. ПЛАВЛЕННЯ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЯ	208
1. Плавлення	208
2. Кристалізація	213
§ 27. ПАРООУТВОРЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ	216
1. Пароутворення та конденсація	216
2. Кипіння.....	218
3. Питома теплота пароутворення.....	220

§ 28. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ	224
1. Перетворення енергії під час роботи теплового двигуна.....	224
2. Парова турбіна.....	225
3. Реактивний двигун.....	225
4. Двигун внутрішнього згорання.....	226
5. Теплові двигуни та захист довкілля	230
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	234
ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК.....	250

Навчальне видання

ГЕНДЕНШТЕЙН Лев Елевич

ФІЗИКА

Підручник для 8 класу

Науковий редактор *М. Д. Гінзбург*
Художник обкладинки *Ю. О. Корчмар*
Ілюстрації *Ю. О. Корчмар*
Комп'ютерна верстка *О. О. Удалов*
Коректор *Г. Ф. Висоцька*

Підписано до друку 06.06.2008 р.
Формат 60×90 1/16. Гарнітура Шкільна.
Папір офсетний. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 16. Обл.-вид. арк. 15,65.
Замовлення №162. Наклад 5000 прим.

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