

ФІЗИКА



Є.В. КОРШАК
О.І. ЛЯШЕНКО
В.Ф. САВЧЕНКО

клас 8



ББК 22.3я721
К70

Desigen PLANET-UA

<http://www.ex.ua/view/16867924>

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист МОН України № 1.4/18-679 від 27.03.08 р.)*

**Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено**

Відповідальні за підготовку до видання:

Хоменко О.В. – головний спеціаліст МОН України;
Юрчук І.А. – методист вищої категорії Інституту
інноваційних технологій і змісту освіти

Коршак, Є.В.
К70 Фізика : 8 кл. : підруч. для загальноосвіт. навч. закл. /
Є.В. Коршак, О.І. Ляшенко, В.Ф. Савченко. – К. : Генеза,
2008. – 208 с. : іл.
ISBN 978-966-504-799-5

ББК 22.3я721

ISBN 978-966-504-799-5

© Коршак Є.В., Ляшенко О.І.,
Савченко В.Ф., 2007
© Видавництво «Генеза»,
оригінал-макет, 2008

Дорогий друже!

Ти тримаєш у руках свій другий підручник з фізики. З першого підручника (7 клас), вивчаючи природознавство та інші предмети, з повсякденного життя ти ознайомився з багатьма явищами, які вивчає фізика, з методами, якими вона користується; з тим, як одержані знання застосовуються для пояснення явищ навколишнього світу, для поліпшення життя людини.

Ти також зрозумів, що для опанування фізики потрібно немало зусиль, уваги: спостерігати фізичні явища, виконувати досліди, розв'язувати задачі, проводити різноманітні вимірювання, осмислювати результати пізнавальних дій.

Ти отримаєш величезне задоволення від того, як фізика відкриває перед тобою все нові й нові можливості: самостійно розбиратися у таємницях і загадках природи, використовувати набуті знання, уміння і навички у повсякденному житті, одержати змогу зробити й власний внесок у розвиток вітчизняної і світової науки, техніки, культури.

У цьому підручнику основна увага зосереджується на вивченні механічних та теплових явищ. Ти зрозумієш, що нерухомих тіл насправді немає, що наука вивчає лише відносні рухи й відносний спокій; які механічні рухи зустрічаються у природі, а які використовуються у техніці. Ти дізнаєшся, як користуватися простими механізмами для полегшення виконання роботи тощо. Переконаєшся, що вивчення у фізиці теплових явищ відкриває широкі можливості для створення автомобілів, літаків, ракет, для вивчення Всесвіту.

Май також на увазі, що вивчення механічних і теплових явищ є основою для опанування наступних розділів фізики: електромагнетизму, атомної та ядерної фізики. Тому тобі слід добре засвоїти увесь матеріал. Адже сьогодні неocenенною є роль фізики у медицині, мистецтві, у розвитку багатьох інших наук – астрономії, хімії, біології тощо.

Щоб полегшити тобі орієнтування у тексті підручника і поліпшити засвоєння навчального матеріалу, автори використовують у ньому певні позначення, які означають:



цікаві факти,
додаткові відомості,
біографії вчених



актуалізуючі
й контрольні запитання



важливо знати,
запам'ятати



для додаткового
читання

*Тож бажаємо тобі успіхів на тернистому шляху
пізнання природи і людини!*

Автори



Розділ 1

МЕХАНІЧНИЙ РУХ

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- що таке механічний рух;
- що нерухомих тіл у природі немає.

Ви зможете **пояснити**:

- відмінність траєкторії руху і швидкості в різних системах відліку;
- графіки руху тіл та визначати за графіком величини, що характеризують рух.

Ви будете **вміти**:

- вимірювати швидкість руху, період і частоту коливань;
- користуватися приладами для вимірювання часу і відстані, подавати результати вимірювань у вигляді таблиць і графіків;
- розв'язувати задачі, які стосуються механічного руху.



§ 1. Механічний рух і простір. Відносність руху

Світ механіки

Механіка – наука про механічний рух матеріальних тіл і взаємодії між ними, які при цьому відбуваються. Слово *механіка* походить від грецького «механікс» – хитрість.

Найважливіший висновок, який зробила наука в процесі свого розвитку: **нерухомих тіл у природі немає**. У науці говорять, що рух є абсолютним. Проте повсякденний досвід спонукає нас думати, що існує багато тіл, які є нерухомими. Коли ми йдемо дорогою, то дерева біля неї, як і будинки, здаються нерухомими, хоча насправді вони рухаються разом із обертанням Землі навколо її осі, рухаються разом із Землею по орбіті навколо Сонця і т. д.

Таким чином, наука вивчає не абсолютні (істинні) рухи тіл, а їх рухи відносно інших тіл, які цілком умовно вважаються нерухомими.

Ви вже маєте багато відомостей про рухи тіл, їх швидкості тощо з повсякденного життя, уроків фізики, природознавства, математики та інших предметів. Тепер перед вами все ширше розкривається світ рухомих тіл та їх взаємодій, які вивчає фізика.

Бажаючи описати стан фізичних тіл довкола нас, ми часто називаємо одні з них нерухомими, інші – рухомими.

Дерева в лісі чи садку, різні будівлі, каміння на дні струмка, мости, береги річок ми вважаємо, не вагаючись, нерухомими, а воду в річці чи струмку, літаки в небі, автомобілі, що їдуть дорогою, – рухомими.

Що дає підставу поділяти тіла на нерухомі й рухомі? Чим рухомі тіла відрізняються від нерухомих?

Коли ми говоримо про автомобіль, який рухається, то маємо на увазі, що в певний момент часу він був поруч з нами, а в інші моменти відстань між нами і автомобілем змінювалася, хоч ми залишалися на тому самому місці.

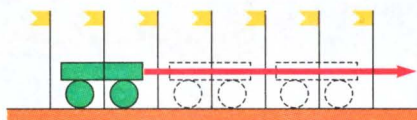
Нерухомі тіла протягом усього спостереження не змінюють свого положення відносно спостерігача.

Проведемо такий дослід. Розмістимо, наприклад, вертикально прапорці на столі на деякій відстані один від одного на одній прямій. Поставимо біля першого з них візок з ниткою і почнемо його тягти. Спочатку він переміститься від одного прапорця до другого, потім – до третього і т. д. Тобто візок змінюватиме своє положення відносно прапорців (мал. 1).

6



Зміну положення тіла в просторі називають механічним рухом.



Мал. 1. Зміна положення візка ілюструє механічний рух

Якщо певне тіло змінює своє положення в просторі, то про нього кажуть, що воно здійснює механічний рух. Коли такої зміни немає, то це тіло вважається нерухомим, тобто таким, що перебуває у спокої.



Механічний рух відносний.

Механічний рух, як і спокій, відносний. Одне й те саме тіло може бути нерухомим відносно одного тіла і рухомим відносно іншого. Наприклад, водій автомобіля, який рухається дорогою, є рухомим відносно спостерігача, що стоїть на узбіччі, і нерухомим відносно пасажира в салоні автомобіля.



Механічний рух – це зміна положення тіла відносно інших тіл.

Отже, щоб описати механічний стан тіла, треба чітко знати, відносно яких тіл проводиться порівняння. Відповідно до цього можна дати інші означення руху.

Для опису механічного руху обирають тіло відліку.

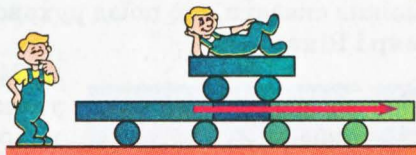
Вибір тіла відліку може суттєво змінити опис стану тіла. Переконаємося в цьому на такому прикладі.

Розмістимо на столі довгий візок, а на нього поставимо короткий (мал. 2). Притримуючи короткий візок, переміщуватимемо довгий візок. Його положення змінюватиметься і відносно короткого візка, і відносно стола. Уявні спостерігачі, які стоятимуть

Тіло, відносно якого визначається положення даного тіла, називається тілом відліку.



Мал. 2. Опис стану тіла залежить від вибору тіла відліку



на короткому візку і на столі, скажуть, що довгий візок здійснює механічний рух. Проте спостерігач, який стоятиме на довгому візку, не знаючи, що його переміщують, скаже, що в стані механічного руху перебувають короткий візок і стіл.

Отже, говорячи про механічний рух довільного фізичного тіла, обов'язково треба вказувати тіло відліку.

7

1. Що таке механічний рух?
2. Для чого обирають тіло відліку?
3. Як впливає вибір тіла відліку на опис механічного стану тіла?
4. Чому механічний рух відносний?
5. Чи існують у природі нерухомі тіла?



Вправа 1

1. У вагоні залізничного поїзда, який рухається, на столику лежить книжка. У русі чи в спокої перебуває книжка відносно: а) столика; б) рейок; в) моста через річку; г) води в цій річці; д) Місяця?

Як зміняться відповіді на ці запитання, якщо поїзд стоятиме?

2. Пасажири стоять на палубі корабля, який підпливає до пристані. Відносно яких предметів вони нерухомі? Рухомі?

3. Рухаються чи перебувають у спокої відносно один одного люди, які стоять на ескалаторі метро або сидять у салоні автобуса чи літака?

4. Пасажир, сідаючи у відкритий автомобіль, помітив, що вітер дме з півночі. Потім під час руху автомобіля він зазначив, що вітер дме з півдня. Як це пояснити?

§ 2. Механічний рух і час

Механічний рух відбувається не тільки *в просторі*, але і *в часі*. Недостатньо назвати точки простору, в яких перебувало тіло. Важливо вказати послідовність перебування його в цих точках. Так, якщо назвати станції, на яких побував поїзд (наприклад, Житомир, Одеса, Вінниця, Київ), то напрям його руху залишиться загадкою. Коли повідомити, що о 19 год 00 хв поїзд був у Києві, о 21 год 30 хв – у Житомирі, о 1 год 05 хв наступної доби – у Вінниці, а о 7 год 30 хв – на станції Одеса, то можна сказати, що поїзд рухався з Києва до Одеси через Житомир і Вінницю.



Рух і час – нероздільні.

Механічний рух не можна описати, не вказавши час руху. Такий нерозривний зв'язок руху й часу відображає закон єдності руху й часу.

8

Час, як і будь-яку іншу фізичну величину, можна виміряти. Його вимірюють за допомогою годинників, які умовно поділяють на природні та штучні. Годинники відображають єдність часу й руху, оскільки в кожному з них використано певний рух.

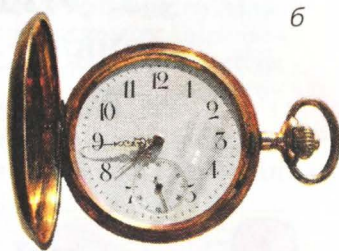
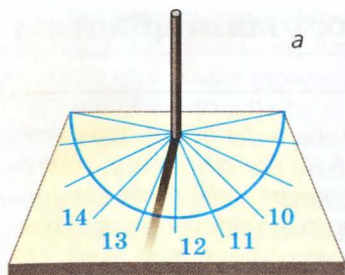
В основу природних годинників покладено рух Сонця, Місяця, Землі. Люди давно помітили, що ці небесні тіла обов'язково повторюють своє положення відносно інших тіл. Так, Сонце щодня сходить у східній частині небосхилу, а заходить у західній. Це відбувається тому, що Земля обертається навколо своєї осі. Час одного оберту Землі навколо осі називали *добою*. Час між двома сходами Сонця дорівнює *одній добі*.

Висота Сонця над горизонтом у полудень не залишається сталою, за винятком екватора. Вона деякий час збільшується, а потім – зменшується. Час, який проходить між двома найвищими положеннями Сонця над горизонтом у полудень, дорівнює *одному рокові*.

Годинників (мал. 3) створено дуже багато. Найпростіший з них – пісковий годинник. У ньому пісок пересипається через маленький отвір з однієї посудини в іншу. Таким годинником залежно від його розмірів можна вимірювати час від однієї хвилини до кількох годин. Точність таких годинників невисока і застосування їх обмежене.

Механічні та електронні годинники мають досить високу точність, тому вони поширені в науці, техніці та побуті.

Для особливо точних вимірювань застосовують атомні годинники, дія яких ґрунтується на явищах, що відбуваються в



Мал. 3. Типи годинників:
а – сонячний; б – механічний;
в – електронний

молекулах і атомах. Саме за допомогою цих годинників установили, що одна доба відрізняється від іншої на тисячні частини секунди.

Використовують різні одиниці часу: добу, рік, годину (год), хвилину (хв), секунду (с). Основною одиницею¹ часу є секунда (с).

Різні одиниці часу пов'язані між собою так:

$$1 \text{ секунда} = \frac{1 \text{ доба}}{86\,400};$$

$$1 \text{ рік} = 365 \text{ (366) діб};$$

$$1 \text{ доба} = 24 \text{ год} = 1440 \text{ хв} = 86\,400 \text{ с};$$

$$1 \text{ год} = 60 \text{ хв} = 3600 \text{ с};$$

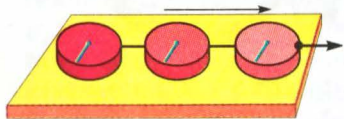
$$1 \text{ хв} = 60 \text{ с}.$$

1. Чому не можна описати рух без часу?
2. Чи можна відділити час від руху?
3. Які природні явища використовують для вимірювання часу?
4. Назвіть природні й штучні годинники.
5. Які є одиниці часу?
6. Яка одиниця часу є основною?

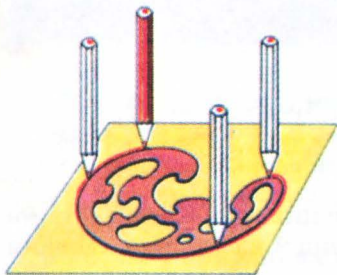
¹ Основна одиниця – це одиниця фізичної величини, яка використовується в міжнародній системі СІ.

§ 3. Фізичне тіло і матеріальна точка

Усі тіла, що оточують нас, у фізиці називають *фізичними тілами*. Тіла складаються з якоїсь *речовини*, мають певний об'єм і форму. Вони можуть рухатися або бути нерухомими залежно від тіла відліку. Причому рухатися може все тіло або тільки його частини.



Мал. 4. Лінія на шайбі зберігає свій напрям під час поступального руху шайби



Мал. 5. Олівець, яким обводять фігуру на папері, рухається поступально

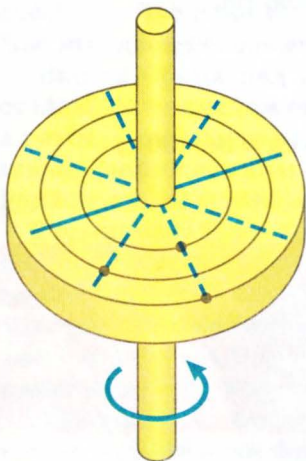
Виконаємо такий дослід. Проведемо пряму лінію на хокейній шайбі і прикріпимо до неї нитку (мал. 4). Покладемо шайбу на поверхню стола і почнемо тягти за нитку. Шайба переміщуватиметься відносно стола і навколишніх предметів, а лінія на ній зберігатиме попередній напрям. Тобто нанесена лінія переміщуватиметься паралельно сама собі.



Рух фізичного тіла, при якому будь-яка лінія, нанесена на тіло, залишається паралельною своєму попередньому положенню, називають поступальним.

Так, поступально рухається кузов автомобіля на горизонтальній дорозі, вантаж, який піднімається підймальним краном, олівець, яким обводять яку-небудь фігуру на папері (мал. 5).

Насадимо шайбу на металеву вісь так, щоб вона проходила через її центр, і почнемо її обертати (мал. 6). Лінія на шайбі весь час змінюватиме свою орієнтацію в просторі, кожна її точка описуватиме коло.



Мал. 6. Кожна точка на шайбі, яка обертається, описує коло

Для спрощення розгляду закономірностей механічного руху в фізиці іноді застосовують штучний прийом, коли можливо нехтувати формою і розмірами тіла.

Якщо розмірами і формою фізичного тіла нехтують, то його вважають *матеріальною точкою*.

Поїзд, що рухається з Києва до Львова, відстань між якими близько 600 км, можна вважати матеріальною точкою, оскільки його довжина значно менша від відстані, яку пройшов поїзд між двома містами. Проте цей самий поїзд на вокзалі аж ніяк не можна вважати матеріальною точкою. У цьому можна переконатися, пройшовши від локомотива до останнього вагона.

Рух фізичного тіла, коли кожна його точка рухається по колу, називають обертовим.



Матеріальна точка – це тіло, лінійними розмірами якого у певних випадках нехтують.



1. Який рух називають поступальним?
2. Назвіть тіла, які рухаються поступально.
3. Який рух називають обертовим?
4. Назвіть приклади обертового руху тіл.
5. За яких умов фізичне тіло можна вважати матеріальною точкою?
6. Коли космічний корабель можна вважати матеріальною точкою?



11

§ 4. Траєкторія руху тіла

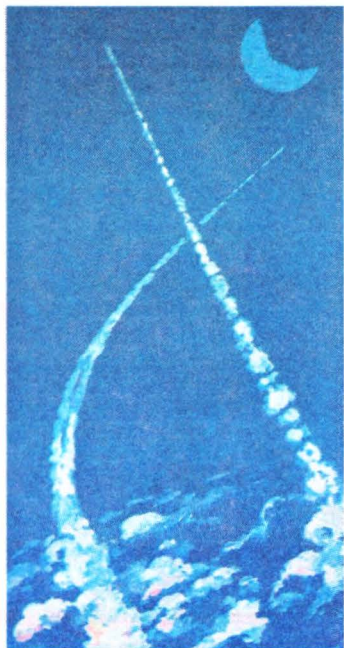
Здійснюючи механічний рух, кожне тіло, яке можна вважати матеріальною точкою, поступово переходить з однієї точки простору в іншу. Сукупність таких точок утворює неперервну лінію.

Лінія, яку описує тіло під час механічного руху, називається *траєкторією*.

Для дослідження механічного руху використовують різні фізичні явища, які роблять траєкторію видимою. Так, під час руху літака у високих шарах атмосфери переохолоджена пара води конденсується на частинках продуктів згоряння палива й утворює туманний слід, який добре видно на фоні блакитного неба (мал. 7).

Про траєкторію руху можна судити, наприклад, за слідами, що залишає лижник на снігу, або за відбитками коліс планетохода на поверхні Місяця.

Для дослідження рухів тіл використовують різні види фото-і кінозйомки. На малюнку 8 видно, що деякі частинки, з яких складаються атоми, рухалися спочатку по прямих лініях,



Мал. 7. Траєкторію руху літака можна простежити за туманним слідом

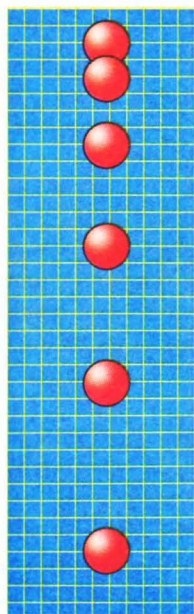


Мал. 8. Сліди мікрочастинок у дослідницькій камері

а потім їх траєкторії викривилися. Вивчення цієї фотографії дало змогу вченим визначити основні фізичні характеристики частинок.

Рухомі тіла можуть описувати траєкторії різної форми. За виглядом траєкторії, рухи поділяються на прямолінійні та криволінійні.

Випущений із руки м'яч падає на землю, описуючи траєкторію у вигляді прямої лінії. Це видно з фотографії (мал. 9), де зафіксовано положення м'яча через однакові інтервали часу. Якщо сполучити центри зображень м'яча, то дістанемо пряму лінію.



Якщо траєкторією руху є пряма лінія, то такий рух називають **прямолінійним**.

М'ячик, кинутий під кутом до горизонту, має криволінійну траєкторію руху (мал. 10). Якщо сполучити центри зображень м'яча, то дістанемо криву лінію.



Якщо траєкторією руху є крива лінія, то такий рух називають **криволінійним**.

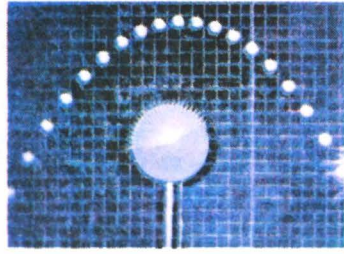
При криволінійному русі тіло описує криву лінію.

Мал. 9. Рух м'яча, що вільно падає

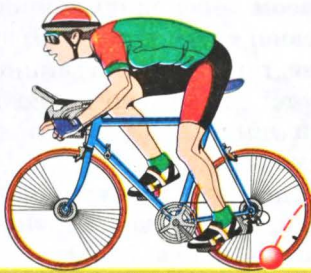
Вигляд траєкторії не однозначний. Він залежить від вибору тіла відліку.

Велосипедист, який сидить у сідлі велосипеда й крутить педалі, вважає, що точка колеса рухається по колу. Для спостерігача, який стоїть на узбіччі, траєкторія руху цієї точки складніша (мал. 11).

Якби астронавт спостерігав Сонячну систему, перебуваючи далеко за її межами, то він би зазначив, що планети рухаються по замкнених



Мал. 10. Стробоскопічний знімок м'ячика, кинутого під кутом до горизонту, через однакові інтервали часу



Мал. 11. Таку траєкторію руху точки колеса бачить спостерігач, який стоїть на узбіччі

орбітах, схожих на витягнуті кола (еліпси). Перебуваючи на Землі, астрономи спостерігають рух планет по дуже складних траєкторіях, які мають форму різноманітних петель.

Форма траєкторії руху залежить від вибору тіла відліку.

Вибір тіла відліку дає змогу спростити форму траєкторії і полегшити розрахунки руху тіла. Колись учені вважали, що зорі й планети рухаються навколо Землі як центра Всесвіту. Тоді не можна було точно розрахувати рух планет за видимими складними траєкторіями і передбачити їхній рух у майбутньому. Коли польський учений **Міколай Коперник** (1473–1543) встановив, що всі планети Сонячної системи, як і Земля, обертаються навколо Сонця, то розрахунки їхнього руху значно спростилися.

Траєкторія відносна, її вигляд залежить від вибору тіла відліку.





1. Який рух називають прямолінійним?
2. Який рух називають криволінійним?
3. Наведіть приклади прямолінійного руху.
4. Наведіть приклади криволінійного руху.
5. Що таке траєкторія руху і від чого залежить її вигляд?
6. До чого веде хибний вибір тіла відліку?
7. Які висновки щодо руху планет зробив Коперник?

§ 5. Шлях, який проходить тіло

Тіло, рухаючись, із часом переходить з однієї точки простору в іншу. Довжина описаної тілом траєкторії з часом збільшується. Знаючи початкове положення тіла, вигляд траєкторії і її довжину, можна визначити положення тіла в довільний момент часу.



Мал. 12. Для вимірювання лінійних розмірів застосовують лінійки, рулетки, мірні стрічки тощо

Довжину траєкторії, описаної тілом за певний час, або інтервал часу, називають шляхом.

При будь-якому русі тіл пройдений ними шлях може тільки збільшуватися. Так, якщо ви від парти до дошки подолали шлях 5 м, то при поверненні назад тією самою траєкторією ваш шлях загалом буде 10 м.

Шлях як фізична величина не має напрямку, але має певне *числове значення*, яке дорівнює довжині траєкторії. У математичних записах шлях позначають малою літерою l .



Мал. 13. Лічильник обертів колеса велосипеда

Для вимірювання шляху використовують прилади, призначені для вимірювання лінійних величин. Це – лінійки, рулетки, мірні стрічки тощо (мал. 12). У транспортних засобах – автомобілях, залізничних локомотивах, велосипедах, мотоциклах – застосовують спеціальні лічильники обертів коліс, які показують довжину шляху.

На малюнку 13 показано лічильник, який установлюють на велосипедах.

Так само працює і спеціальний вимірник довжини – курвіметр, який використовується для визначення по карті реальної відстані між двома пунктами. Його маленьке коліщатко із зубцями котиться по вимірюваній лінії, а лічильник за кількістю обертів визначає довжину лінії. Далі з використанням масштабу карти чи іншого зображення визначають пройдений шлях.

Основною одиницею довжини є *метр* (м). Використовують також кратні й частинні одиниці довжини: кілометр (км), дециметр (дм), сантиметр (см), міліметр (мм) тощо.

$$1 \text{ км} = 1000 \text{ м} = 10^3 \text{ м};$$

$$1 \text{ дм} = 0,1 \text{ м} = 10^{-1} \text{ м};$$

$$1 \text{ см} = 0,01 \text{ м} = 10^{-2} \text{ м};$$

$$1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м} = 10^{-3} \text{ м}.$$

В астрономії застосовують такі одиниці довжини:

$$1 \text{ світловий рік (св. рік)} = 9,46073 \cdot 10^{15} \text{ м};$$

$$1 \text{ астрономічна одиниця (а.о.)} = 1,495993 \cdot 10^{11} \text{ м};$$

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,085678 \cdot 10^{16} \text{ м}.$$

Допускається також застосування таких одиниць, як морська миля (1 миля = 1852 м) та ангстрем ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$).

1. Що таке шлях?
2. Яка основна одиниця довжини?
3. Які одиниці довжини ви знаєте?
4. Які прилади використовуються для вимірювання шляху?



§ 6. Швидкість руху тіла

Коли тіло рухається, то за певний час воно проходить деякий шлях. Для різних рухомих тіл цей шлях може бути різним. Пішохід за дві години пройде лише до 10 км, а автомобіль за такий самий час проїде 100 км. Порівнюючи рух пішохода й автомобіля, кажуть, що автомобіль рухається швидше за пішохода.

Для порівняння руху різних тіл у фізиці використовують таку характеристику руху, як *швидкість*.

Швидкість – це фізична величина, що характеризує механічний рух і дорівнює відношенню шляху, який проходить тіло, до інтервалу часу, за який цей шлях пройдено.



Пішохід у наведеному вище прикладі за 1 год проходить 5 км.

Отже, його швидкість дорівнює 5 кілометрів за годину $\left(5 \frac{\text{км}}{\text{год}}\right)$.

Відповідно автомобіль у цьому прикладі має швидкість $50 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Для обчислення швидкості механічного руху треба пройдений шлях поділити на час, за який цей шлях пройдено:

$$\text{швидкість} = \frac{\text{шлях}}{\text{час}}.$$

Позначимо ці величини літерами: v – швидкість, l – шлях, t – час; тоді дістанемо формулу швидкості:

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

16

Основною одиницею швидкості є метр за секунду $\left(1 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$.

Задача. З якою швидкістю летів літак, якщо за 12 с він подолав шлях 1200 м?

Дано:

$$t = 12 \text{ с},$$

$$l = 1200 \text{ м}.$$

$v = ?$

Розв'язання

$$v = \frac{l}{t}; v = \frac{1200 \text{ м}}{12 \text{ с}} = 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь. Літак летів зі швидкістю $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Розглянута тут швидкість – це так звана середня швидкість проходження шляху, а не швидкість тіла у кожний момент руху.

Швидкість тіла у кожний момент часу або у кожній точці траєкторії руху називається **миттєвою швидкістю**. Така швидкість має напрям і визначається приладами, які називаються **спідометрами**.

Наведемо деякі значення швидкостей:

швидкість світла у вакуумі майже

$$300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

швидкість руху Землі по орбіті навколо Сонця:

$$30 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

швидкість звуку в повітрі за температури 20 °С:

$$v = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 3,31 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

швидкість літака:

$$200 \dots 2000 \frac{\text{км}}{\text{год}} \approx 50 \dots 560 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

швидкість пішохода:

$$4 \dots 5 \frac{\text{км}}{\text{год}} \approx 1,1 \dots 1,4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

швидкість равлика:

$$0,2 \frac{\text{м}}{\text{год}} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Можуть використовуватися також кратні та частинні одиниці вимірювання швидкості. Іноді користуються одиницею швидкості вузол: 1 вуз = 1 миля/год = 0,514 м/с.

$$1 \frac{\text{см}}{\text{с}} = 0,01 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$1 \frac{\text{дм}}{\text{с}} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 10^{-1} \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$1 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 1000 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$1 \frac{\text{км}}{\text{год}} = \frac{1000}{3600} \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$1 \frac{\text{м}}{\text{хв}} = \frac{1}{60} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Швидкість механічного руху є відносною величиною, її значення залежить від вибору тіла, відносно якого визначається швидкість.

Дослідимо рух пасажирів, який переміщується у вагоні рухомого поїзда в напрямі до локомотива. Виміряємо час руху пасажирів і пройдений ним шлях. Нехай за розрахунками його швидкість дорівнює $3 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Розрахунки спостерігача, який перебуває в стані спокою відносно залізничного полотна, дадуть результат $83 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Звідси маємо, що поїзд рухався відносно полотна зі швидкістю

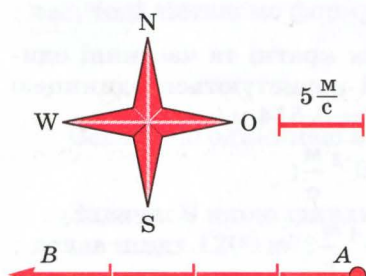
$$v = 83 \frac{\text{км}}{\text{год}} - 3 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 80 \frac{\text{км}}{\text{год}}.$$

Відносність руху вперше ввів у розгляд видатний італійський учений **Г. Галілей**.

Числове значення швидкості тіла не дає повної інформації про механічний рух тіла. Важливо знати, в якому напрямі рухається тіло. Тому часто на малюнках і схемах швидкість зображають стрілками, які показують напрям руху тіла. Довжина стрілки в певному масштабі показує числове значення швидкості.

Вправа. Автомобіль рухається зі сходу на захід зі швидкістю $20 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Зобразити цю швидкість графічно (мал. 14).

Розв'язуємо завдання в кілька етапів.



Мал. 14. До задачі про рух автомобіля

1. Визначаємо на папері напрям схід–захід. Позначаємо рухоме тіло точкою *A* і від неї проводимо промінь схід–захід.

2. Обираємо такий масштаб: відрізок завдовжки 1 см відповідає швидкості $5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$.

3. Відкладаємо на промені чотири відрізки по 1 см і ставимо стрілку в напрямі руху точки *A*. Відрізок *AB* відповідає швидкості $v = 20 \frac{\text{М}}{\text{с}}$.

У фізиці й техніці часто доводиться визначати пройдений тілом шлях, коли відомі час і швидкість його руху. Для цього користуються формулою для обчислення швидкості, виконавши над нею певні математичні операції.

Скориставшись властивостями відношення, із формули швидкості $v = \frac{l}{t}$ матимемо формулу для обчислення шляху:

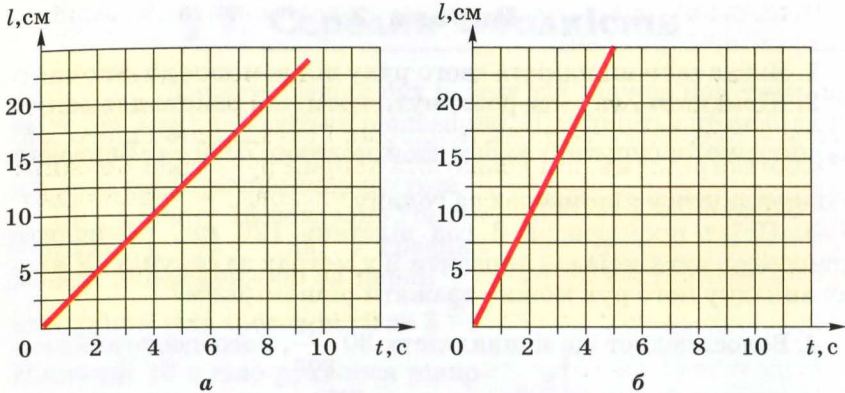
$$l = vt.$$

Така залежність на графіку зображається прямою лінією. На малюнку 15, *a* показано залежність шляху від часу під час руху сталльної кульки в густій рідині. З графіка можна дізнатися, що через кожні 2 с шлях, пройдений кулькою, збільшувався на 5 см, тобто швидкість руху кульки

$$v = \frac{l}{t}; v = \frac{5 \text{ см}}{2 \text{ с}} = 2,5 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

або

$$v = \frac{10 \text{ см}}{4 \text{ с}} = 2,5 \frac{\text{см}}{\text{с}}.$$



Мал. 15. Графіки шляху кульки

Отже, швидкість такого руху не змінюється з часом. Рух, швидкість якого з часом не змінюється, називають *рівномірним*. Під час рівномірного руху тіло за будь-які однакові інтервали часу проходить *однакові відрізки шляху*.

19

На малюнку 15, б показано графік шляху, пройденого кулькою, де за кожні 2 с вона проходить 10 см. Швидкість руху кульки у цьому разі

$$v = \frac{10 \text{ см}}{2 \text{ с}} = 5 \frac{\text{см}}{\text{с}}.$$

За нахилом графіка шляху можна оцінювати швидкість тіла або порівнювати швидкості різних тіл: чим більша швидкість, тим графік шляху крутіший.

Рух рівномірний тоді, коли швидкість стала.



Знаючи пройдений шлях і швидкість руху тіла, можна розрахувати час руху:

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

1. Що таке швидкість механічного руху?
2. Як розрахувати швидкість механічного руху?
3. Які одиниці швидкості застосовують у фізиці? Який між ними зв'язок?
4. Як, знаючи швидкість, знайти пройдений шлях? Час руху?
5. Чому швидкість відносна?
6. Як зображається графік шляху?



Вправа 2

1. Визначити швидкість свого руху від домівки до школи.

2. Швидкість, яку має розвинути космічна ракета для запуску штучного супутника Землі, дорівнює $7900 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Виразити цю швидкість у кілометрах за годину.

3. Поїзд пройшов за 3 год відстань 120 км. Обчислити швидкість руху поїзда і виразити її у метрах за секунду. У якого випадку його рух можна вважати рівномірним?

4. Велосипедист їде зі швидкістю $30 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, його наздоганяє мотоцикліст, який їде зі швидкістю $90 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Зобразити графічно ці швидкості.

5. Штучний супутник Землі в момент виходу на орбіту має швидкість $8 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Який шлях він долає за 1 хв? Відповідь виразити в метрах.

6. Обчислити час, за який при розвантажуванні баржі ящик переміститься стрічковим транспортером на 24 м, якщо швидкість руху стрічки $18 \frac{\text{см}}{\text{с}}$.

7. Швидкість поширення світла у вакуумі дорівнює $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. За який час світло від Сонця подолає відстань до Землі, якщо вона дорівнює 150 млн км?

8*. Виконати необхідні вимірювання і обчислити швидкість руху кінця хвилиної стрілки наручного годинника.

9*. На стрічках паралельних конвеєрів рухаються в протилежних напрямках деталі; одна – зі швидкістю $45 \frac{\text{см}}{\text{с}}$, інша – зі швидкістю $0,2 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ відносно підлоги. З якою швидкістю рухаються деталі одна відносно одної?

* Зірочкою позначено складніші завдання.

§ 7. Середня швидкість

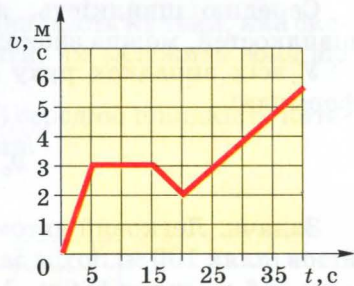
Спостерігаючи рух різних тіл, можна помітити, що мало які з них рухаються рівномірно. Швидкість автомобіля на початку руху збільшується, потім може бути деякий час сталою, а під час гальмування зменшується.

На малюнку 16 показано графік швидкості руху тіла. З графіка можна дізнатися, що за перші 5 с швидкість тіла зросла від 0 до $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Наступні 10 с тіло рухалося рівномірно зі швидкістю $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Між 15-ю і 20-ю секундами швидкість зменшилася з $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ до $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Після цього швидкість знову почала зростати.

Такі подробиці в описі руху не завжди потрібні. Адже нас цікавить, наприклад, не швидкість автобуса на окремих ділянках, а час, коли автобус прибуде в кінцевий пункт свого призначення. Тому часто нехтують змінами швидкості руху, а враховують лише пройдений шлях і час, який потрібний для подолання цього шляху. Розраховану в такому разі швидкість називають середньою.

Рух тіла зі змінною швидкістю називають нерівномірним.



Мал. 16. Графік швидкості руху тіла

Середньою швидкістю називають фізичну величину, яка характеризує нерівномірний рух і чисельно дорівнює відношенню шляху, пройденого тілом, до інтервалу часу, за який цей шлях пройдено.



Середню швидкість v_c розраховують за формулою:

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

Отже, знаючи середню швидкість руху тіла, можна розрахувати шлях, який пройде тіло, і час, за який цей шлях пройдено:

$$l = v_c t; \quad t = \frac{l}{v_c}.$$

Розрахунки для нерівномірного руху виконують так само, як і для рівномірного руху.

Середня швидкість показує, з якою швидкістю має рухатися тіло рівномірно, щоб дану відстань подолати за такий самий час, як і під час нерівномірного руху.

Середню швидкість не можна розуміти як середнє арифметичне значень швидкостей. Тому, якщо окремі ділянки шляху l_1, l_2, l_3 тіло проходило за відповідні інтервали часу t_1, t_2, t_3 , то для обчислення середньої швидкості треба спочатку знайти весь пройдений шлях і весь час цього руху, а потім – поділити увесь шлях на увесь час.

Середню швидкість, як середнє арифметичне окремих швидкостей, можна знаходити лише у деяких випадках руху.

У всіх випадках руху безпомилковим буде використання формули:

$$v_c = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{t_1 + t_2 + t_3}.$$

22

Задача. Легковий автомобіль за 10 с від початку руху пройшов шлях 100 м, потім за одну хвилину пройшов шлях 500 м, а ще за 5 с – шлях 150 м. З якою середньою швидкістю рухався автомобіль?

Дано:

$$t_1 = 10 \text{ с},$$

$$t_2 = 1 \text{ хв} = 60 \text{ с},$$

$$t_3 = 5 \text{ с},$$

$$l_1 = 100 \text{ м},$$

$$l_2 = 500 \text{ м},$$

$$l_3 = 150 \text{ м}.$$

$$v_c = ?$$

Розв'язання

За означенням середня швидкість $v_c = \frac{l}{t}$, де l – шлях, який пройшло тіло, а t – час руху тіла.

Загальний шлях, пройдений автомобілем, $l = l_1 + l_2 + l_3$.

Загальний час, за який цей шлях пройдено, $t = t_1 + t_2 + t_3$.

$$\text{Отже, } v_c = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{t_1 + t_2 + t_3}.$$

Підставивши значення фізичних величин, одержимо

$$v_c = \frac{100 \text{ м} + 500 \text{ м} + 150 \text{ м}}{10 \text{ с} + 60 \text{ с} + 5 \text{ с}} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь. Середня швидкість руху автомобіля $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

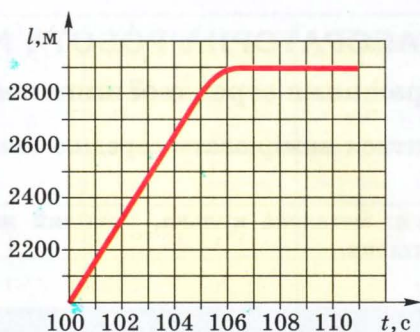
1. Що таке середня швидкість?
2. Коли визначають середню швидкість? Наведіть приклади.
3. Як обчислити середню швидкість?
4. Якими одиницями можна вимірювати середню швидкість?
5. Як знайти пройдений шлях, знаючи час і середню швидкість руху?

Вправа 3

1. Обчислити середню швидкість лижника, який пройшов відстань 20 км за 3 год.

2. Визначити на досліді середню швидкість кульки, яка скочується з похилої дошки, і встановити, чи залежить вона від кута нахилу дошки.

3. Визначити за графіком (мал. 17) середню швидкість катера за час між 104-ю і 106-ю хвилинами.



Мал. 17. Графік руху катера

4. Вагон, рухаючись рівномірно схилом сортувальної гірки, проходить 120 м за 10 с. Скотившись з гірки, він проходить до повної зупинки ще 360 м за 1,5 хв. Визначити середню швидкість вагона за весь час руху.

5. Мотоцикліст проїхав 5 км за перші 10 хв руху і 9,6 км за наступні 8 хв. Якою була швидкість руху на кожній з двох ділянок шляху? Яка середня швидкість руху мотоцикла за весь час руху?

6. Равлик, поміщений в акваріум, з 16 год 30 хв вівторка до 9 год 00 хв найближчого четверга проповз по стінці 42 см. З якою середньою швидкістю рухався равлик?

7. На велосипеді прикріплено лічильник, який показує пройдений шлях у кілометрах. Велосипедист, проїхавши за 18 хв

деяку відстань із середньою швидкістю $24 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, прочитав на лічильнику число 641,5. Що показував лічильник на початку шляху?

8*. Вантажний поїзд перевозив вантаж з одного міста в друге. Якщо враховувати час на зупинки, що тривали 2 год, то поїзд рухався зі середньою швидкістю $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Якщо ж час на зупинки не враховувати, то він рухався зі середньою швидкістю $90 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. На яку відстань перевозився вантаж?

9*. Автомобіль проїхав перші 120 км шляху зі швидкістю 40 км/год, а наступні 120 км – зі швидкістю 60 км/год. Якою була середня швидкість руху на всьому шляху його руху?

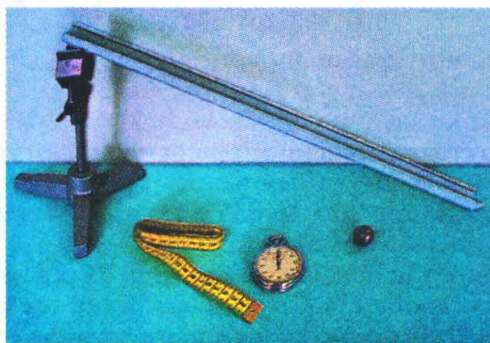
10*. Перші 3 год автомобіль рухався з швидкістю 40 км/год, а наступні 3 год – 60 км/год. Якою була середня швидкість руху автомобіля за весь час руху? Відповідь обґрунтуйте.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Вимірювання середньої швидкості тіла

Мета. Навчитися вимірювати середню швидкість механічного руху.

Обладнання: металева кулька, похилий жолоб, секундомір, мірна стрічка, штатив.



Теоретичні відомості

Середня швидкість визначається в тому разі, якщо тіло рухається нерівномірно. Одним із прикладів такого руху є рух кульки похилим жолобом. Якщо жолоб має невеликий нахил,

то кулька буде скочуватися так повільно, що можна з достатньою точністю виміряти час її руху за допомогою секундоміра, який вмикається при русі кульки.

Виконання роботи

1. Закріпіть один кінець жолоба в лапці штатива так, щоб він мав невеликий нахил до поверхні стола.
2. Виміряйте довжину жолоба за допомогою мірної стрічки.
3. У верхній частині жолоба розмістіть кульку, утримуючи її рукою в цьому положенні.
4. Відпустіть кульку і одночасно увімкніть секундомір.
5. Як тільки кулька торкнеться стола, вимкніть секундомір.
6. Розрахуйте середню швидкість руху кульки.
7. Дослідження повторіть для різних положень кульки на жолобі в початковий момент часу.
8. Результати вимірювань і розрахунків запишіть у таблицю.

№	Шлях l , м	Час t , с	Середня швидкість v_c , м/с
1			
2			
3			
4			

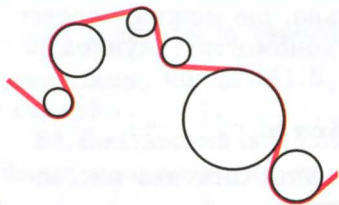
9. Зробіть висновки щодо залежності середньої швидкості від шляху.

10*. Повторіть дослідження для інших нахилів жолоба і зробіть відповідні висновки.

11. Завдання додому. Виміряйте середню швидкість руху тролейбуса чи автобуса, якими ви їдете до школи.

§ 8. Рух точки по колу

Рухи, що відбуваються у природі та техніці, можуть розрізнятися за двома ознаками: за зміною значення швидкості та за зміною її напрямку. Так, наприклад, коли точка чи тіло рухаються вздовж прямої лінії (мають прямолінійну траєкторію), то напрям їх швидкості не змінюється – він збігається з напрямом траєкторії. Хоча при цьому значення

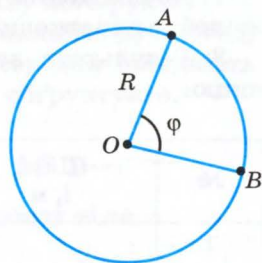


Мал. 18. Криволінійний рух

складеною із шматочків кіл різного розміру. Зрозуміло, що такий рух може бути й рівномірним, тобто кожна точка нитки буде мати швидкість, яка не змінюватиметься з часом за своїм значенням, хоча напрям швидкості точок у кожний момент може змінюватись.

Розглянемо рух матеріальної точки по колу, коли він є рівномірним, тобто значення швидкості з часом не змінюється (мал. 19). Точка, рухаючись по колу радіуса R , за певний час t переходить з точки A в точку B . При цьому відрізок OA повертається на кут φ – кутове переміщення. За цими даними можна схарактеризувати рух кутовою швидкістю:

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



Мал. 19. Рух по колу

де φ (грецька літера «фі») – кутове переміщення; ω (грецька літера «омега») – кутова швидкість.

Кутове переміщення вимірюється в радіанах (рад.). 1 радіан – це таке кутове переміщення, коли траєкторія руху точки – довжина дуги кола AB – дорівнює довжині радіуса R .

Отже, одиницею кутової швидкості є радіан за секунду (рад/с).



1 рад/с дорівнює кутовій швидкості такого рівномірного руху по колу, під час якого за 1 с здійснюється кутове переміщення 1 рад.

При визначенні кутової швидкості слово рад не пишуть, а зазначають 1/с, мається на увазі рад/с.

Рух точки по колу (та обертання твердого тіла) характеризують такі фізичні величини, як **період** і **частота** обертання.

Період обертання (T) – це час, протягом якого точка (тіло) робить один повний оберт по колу.

Період обертання

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

де t – час обертання, а N – кількість зроблених обертів.

Період обертання T вимірюється в секундах. Період дорівнює 1 с, коли точка (тіло) здійснює один оберт за секунду.

Частота обертання (обертова частота):

$$n = \frac{N}{t}, \quad n = \frac{1}{T},$$

Частота обертання n визначає кількість обертів точки (тіла) навколо центра (осі обертання) за 1 секунду.



де N – число обертів, здійснених за час t .

Частота обертання вимірюється в обертах за секунду (об/с).

Ще Архімед дослідив, що для всіх кіл будь-яких розмірів відношення довжини кола до його діаметра є величиною сталою. Це число позначили грецькою літерою π («пі»).

$$\pi = \frac{\text{довжина кола}}{\text{діаметр кола}} = \frac{l}{D} = \frac{l}{2R}.$$

27

$\pi = 3,141592... \approx 3,14$. Таким чином, довжина кола $l = \pi D = 2\pi R$.

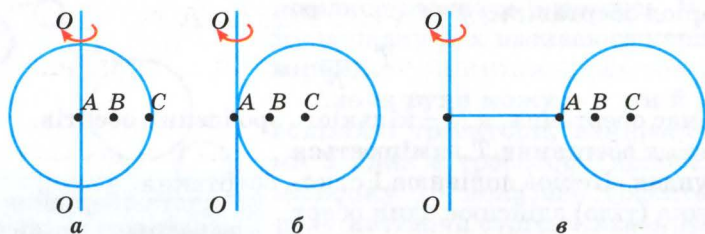
За один оберт матеріальна точка здійснює кутове переміщення 2π рад.

Рух по колу характеризується і звичним для нас поняттям швидкості як шляху, який проходить точка за одиницю часу. У даному випадку ця швидкість називається лінійною. Якщо мати на увазі, що за один оберт (час T) точка проходить шлях $\pi D = 2\pi R$, то лінійна швидкість рівномірного руху точки по колу $v = \frac{\pi D}{T} = \frac{2\pi R}{T}$ або $v = \pi D n = 2\pi R n$.

§ 9. Обертання твердого тіла

Тверді тіла складаються з великої кількості частинок. Абсолютно твердими в науці вважають тіла, відстань між точками яких не змінюється під час явищ, що з ними відбуваються. Але слід мати на увазі, що абсолютно твердих тіл у природі немає.

Як зазначалося в § 3, рухи твердих тіл поділяють на **поступальні** та **обертові**. Тверді тіла можуть обертатися навколо будь-яких осей, у тому числі й тих, що проходять через їхні центри.



Мал. 20. Рух твердого тіла навколо різних осей

У випадку *a* (мал. 20) вісь обертання проходить через центр кулі (наприклад, рухаються колеса транспортних засобів або Земля у своєму добовому обертанні навколо осі). У випадку *б* вісь проходить через край кулі. А у випадку *в* куля перебуває на певній відстані від осі (наприклад, Земля рухається навколо Сонця чи Місяць навколо Землі). У деяких випадках навіть Землю і Місяць можна вважати матеріальними точками, а у деяких це зробити неможливо. Поміркуйте, у яких саме?

28

Що ж є найбільш характерним в обертовому русі твердих тіл? Очевидно, що при цьому всі точки цих тіл у своєму русі описують кола, центри яких знаходяться на осях обертання.

Зрозуміло також, що різні точки тіл за один і той самий час проходять по своїх траєкторіях різні відстані – чим далі від осі обертання ці точки, тим більші ці відстані. Але ж за один і той самий час кутове переміщення φ усіх точок буде однаковим. Отже,

й кутова швидкість $\omega = \frac{\varphi}{t}$ для всіх точок також буде однаковою.

Для опису обертового руху твердих тіл застосовуються ті самі поняття, що й для руху точки по колу: період обертання T – час одного повного оберту; обертова частота (частота обертання) n – кількість повних обертів за одиницю часу; кутова швидкість ω . Крім основної одиниці частоти обертів об/с, застосовують одиниці об/хв, об/год тощо.

Період обертання Землі навколо Сонця становить у середньому 365 діб, а період обертання Місяця навколо Землі у середньому 28 діб. Вивчаючи фізику, астрономію, ви дізнаєтесь, що небесні тіла, наприклад планети Сонячної системи, рухаються не зовсім по колах, а по так званих еліпсах.

Вправа 4

1. Що таке кутове переміщення і кутова швидкість?
2. Що таке період і частота обертання?
3. Який зв'язок між періодом і частотою обертання?
4. Ніпель колеса під час руху велосипеда здійснює 25 обертів за 5 с. Визначте період і частоту обертання колеса велосипеда.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Вимірювання періоду і частоти обертання твердого тіла

Мета. Ознайомитися з обертовим рухом твердих тіл і навчитися визначати періоди й частоти їх обертання.

Обладнання: годинник з годинною, хвилинною та секундною стрілками; секундомір механічний.

Теоретичні відомості

Особливістю обертового руху твердих тіл є те, що всі їх точки рухаються концентричними колами, центри цих кіл лежать на осі обертання. Для визначення частоти обертання n необхідно порахувати кількість повних обертів N за певний час t :

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

Для визначення періоду обертання тіла T скористайтесь формулою:

$$T = \frac{1}{n}.$$

29

Виконання роботи

Визначте характеристики обертального руху стрілок годинника і дані вимірювань запишіть у таблицю.

Тіло, що обертається	Час обертання t , с	Частота обертання n , 1/с	Період обертання T , с	Частота і період обертання в		Лінійна швид- кість крайніх точок v_1 , м/с	Лінійна швид- кість середніх точок v_2 , м/с
				1/хв	1/год		
Годинна стрілка							
Хвилинна стрілка							
Секундна стрілка							

Період обертання визначте у хв і год, частоту обертання визначте в 1/хв і 1/год.

Визначте лінійні швидкості крайніх і середніх точок стрілок, маючи на увазі, що довжина кола $l = 2\pi R$.

Для допитливих

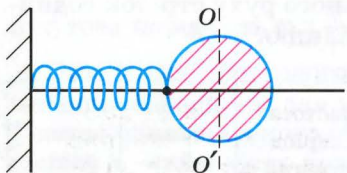
1. Знайдіть у побуті тіла, що здійснюють обертові рухи, і спробуйте визначити частоти та періоди їх обертання.

2. Скориставшись годинником зі стрілками і лінійкою, визначте лінійні швидкості кінців стрілок.

§ 10. Коливальний рух. Амплітуда, період і частота коливань

Коливання – найпоширеніша форма руху в навколишньому світі та техніці. Коливаються дерева під дією вітру, поршні у двигуні автомобіля тощо. Ми можемо розмовляти й чути звуки завдяки коливанням голосових зв'язок, повітря і барабанних перетинок. Коливається серце. Усе це приклади механічних коливань. Світло – це також коливання, але електромагнітні. За допомогою електромагнітних коливань, які поширюються у просторі, відбувається радіозв'язок, радіолокація, телебачення, а також лікуються різні хвороби.

На перший погляд, наведені приклади коливань мають мало спільного. Проте під час їхнього дослідження виявилось, що різні за природою коливання описуються однаковими математичними рівняннями, що значно полегшує їх вивчення.



Мал. 21. Куля з пружиною на горизонтальному стержні

Як же виникають механічні коливання? Розглянемо рух кулі з отвором, прикріпленої до одного кінця зафіксованої пружини на горизонтально розташованому стержні. Другий кінець пружини закріплений у стіні (мал. 21). Нехай у початковий момент куля перебуває у положенні рівноваги OO' .

Розглядатимемо ідеальний випадок, коли в розглянутій системі відсутнє тертя, тобто механічна енергія не зменшується. Якщо кулю відвести праворуч від положення рівноваги, то пружина розтягнеться. При відпусканні кулі пружина змусить її рухатись до положення рівноваги. Оскільки тертя у системі відсутнє, то куля пройде положення рівноваги і, рухаючись ліворуч, стисне пружину. Дійшовши до крайнього лівого положення, куля буде рухатись праворуч і повернеться у крайнє праве положення, коли пружина знову стане максимально розтягнутою. У такому випадку куля здійснить одне повне коли-

вання. Число повних коливань, що відбуваються за одиницю часу, називають частотою коливань. Періодом коливання називають час, за який відбувається одне повне коливання. Амплітудою коливання називають відстань від положення рівноваги до крайнього положення.

вання. У подальшому в ідеальній системі (без тертя) такі коливання будуть відбуватися як завжди довго.

Бачимо, що основною рисою коливань є їх періодичність. Але періодичними є й обертові рухи. На відміну від обертових рухів, які мають для кожної точки колові траєкторії, під час коливальних рухів точка чи тіло рухається в протилежних напрямках по одній і тій самій траєкторії.

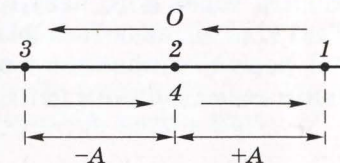
У коливальному русі точка (тіло) проходить всі точки траєкторії руху (окрім двох крайніх) двічі – один раз в одному напрямі, другий – у зворотному.



На малюнку 22 показано одне повне коливання кулі з пружиною. Рух здійснюється у такій послідовності від точки до точки:

1→2→3→4→1

і знову повторюється.



Мал. 22. Рух тіла в коливальному процесі

Максимальне відхилення тіла, що коливається, від положення рівноваги називається амплітудою коливання тіла (на мал. +A і -A).



Час, протягом якого здійснюється одне повне коливання тіла, називається періодом коливання тіла T.

Основною одиницею періоду коливань є секунда.

Частота коливань вимірюється в одиницях за секунду. Ця одиниця називається герц (Гц) на честь німецького фізика Генріха Герца, який у 1884 р. експериментально довів існування електромагнітних хвиль.

Частота коливань f показує, яку кількість коливань тіло здійснює за одиницю часу.



Період коливань тіл T пов'язаний з частотою їх коливань f^* співвідношенням:

$$T = \frac{1}{f}.$$

1. Наведіть приклади коливань. Які з них є механічними?
2. Що таке амплітуда механічних коливань?
3. Що таке період і частота коливань, який взаємозв'язок між ними?



* Примітка. Відповідно до ДСТУ частота коливань може позначатись літерами f або ν .

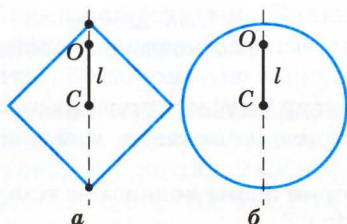


4. Які періоди коливань тіл, якщо їх частоти 0,5; 1,0 і 2,0 Гц?
5. Тягар на пружині, розглянутий на початку параграфа, за 20 с здійснив 10 повних коливань. Які період і частота цих коливань?

§ 11. Фізичний та математичний маятники

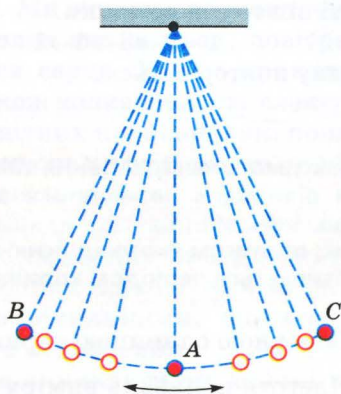
Будь-яке тіло, яке має вісь обертання, що не проходить через його центр мас, здатне здійснювати коливання. Такі тіла називаються **фізичними маятниками**. У тіл правильної форми, наприклад у плоских фігур, центр мас збігається з їхнім геометричним центром (мал. 23).

32



Мал. 23. Фізичні маятники:

O – осі обертання;
 C – центри мас;
 l – довжина підвісу фізичного маятника



Мал. 24. Нитяний маятник



Відстань від осі обертання фізичного маятника до його центра мас l називається довжиною підвісу.

Якщо такі тіла вивести зі стану рівноваги, вони будуть здійснювати коливання. Коли в системі не було б тертя, такі коливання відбувалися б дуже довго.

Найпростішим маятником для досліджень є так званий нитяний маятник (мал. 24). Це кулька, підвішена на нитці. Довжиною такого маятника є відстань від точки підвісу нитки до центра кульки. Якщо таку кульку вивести зі стану рівноваги (перемістити в точку B або C), вона здійснюватиме коливання по дузі кола BAC .

Звичайно, такі коливання будуть характеризуватись їх періодом T і частотою f та можуть мати різну амплітуду.

Для спрощення розгляду певних явищ у науці часто користуються ідеальними моделями. Такою ідеальною моделлю є математичний маятник.

Зрозуміло, що у природі немає ні точкових тіл, ні нерозтяжних і невагомих ниток. Але у багатьох випадках нитяний маятник можна вважати наближеним до математичного.

Математичним маятником вважають точкове тіло, підвішене на нерозтяжній і невагомій нитці.



1. Що таке фізичні маятники? Наведіть приклади фізичних маятників.
2. Що таке довжина маятника?
3. Який маятник називається нитяним? Чому дорівнює його довжина?
4. Що вважається математичним маятником? Чи існують математичні маятники?



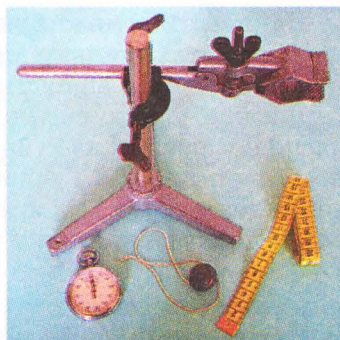
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

33

Дослідження коливань нитяного маятника

Мета. Дослідити залежність періоду коливань нитяного маятника від амплітуди коливань, маси кулькок і довжини маятника.

Обладнання: набір з трьох кулькок різної маси на нитках; секундомір або годинник; лінійка з міліметровими поділками або мірна стрічка; штатив з лапкою.



Виконання роботи

1. Підвісьте до штатива одну кульку на нитці якомога більшої довжини. Відведіть кульку від положення рівноваги на невелику відстань і відпустіть. Виміряйте час 10 повних коливань і визначте їх період.

Повторіть дослід ще два рази, відводячи кульку на інші відстані (але невеликі) від положення рівноваги.

Порівняйте значення одержаних періодів коливань і зробіть висновок.

2. Виконайте три досліди з маятниками, що мають однакові довжини підвісів, але різні маси важків. Виміряйте час 10 повних коливань і визначте їхні періоди. Результати вимірювань запишіть у зошит. Зробіть висновки.

3. Виготовте маятник з найбільшою довжиною нитки. Визначте час 10 повних коливань і знайдіть їхній період.

Зробіть довжину маятника удвічі меншою і знову знайдіть період його коливань.

Ще раз зменшіть довжину маятника удвічі (порівняно з початковою довжиною в 4 рази) і знову знайдіть період коливань.

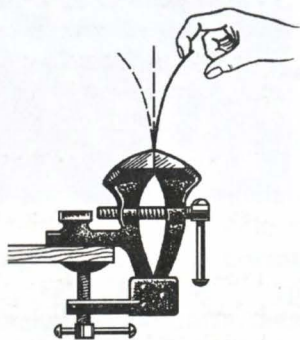
Порівняйте періоди коливань за різних довжин маятника і зробіть висновки.

§ 12. Звукові і ультразвукові коливання та їх застосування

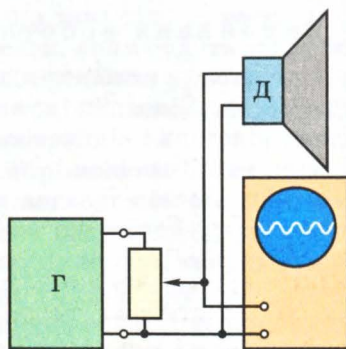
Звукові явища виникають через механічні коливання різних тіл. Проте, не будь-які механічні коливання створюють звук і не за будь-яких умов. Розглядаючи коливання маятника, можна помітити, що звукові коливання в цьому разі не виникають, хоч амплітуда таких коливань може бути й досить великою. Отже, амплітуда не є тією основною характеристикою, за якою відрізняють звукові коливання від просто механічних.

Найпростіше можна одержати звукові коливання, закріпивши в лебедках сталюю лінійку (пластину), вивівши її зі стану рівноваги і різко відпустивши (мал. 25).

Дослідимо коливання генератора звукових коливань, одночасно подаючи їх на гучномовець і на вхід електронного осцилографа (мал. 26). Гучномовець перетворює електричні коливання генератора Г на механічні коливання дифузора Д, які надають коливального руху частинкам повітря – у навколишньому



Мал. 25. Коливання сталюї лінійки



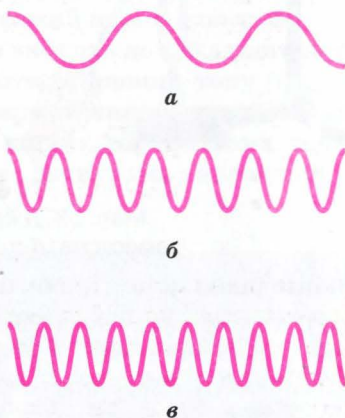
Мал. 26. Спостереження за звуковими коливаннями

просторі поширюється звукова хвиля. Ця хвиля досягає органів слуху людини (чи інших приймачів), викликаючи коливання барабанної перетинки. Проте звук ми чуємо не завжди.

Звукові коливання

Почнемо дослідження коливань з невеликих частот – кількох коливань за секунду (мал. 27, а). На екрані осцилографа спостерігаємо графік, дифузор гучномовця коливається, але звуку ми не чуємо. Поступово збільшуватимемо частоту коливань. За певної частоти з'являється звук. Людина починає його чути лише тоді, коли частота коливань досягає значень 16–20 Гц. Коливання з меншими частотами називають **інфразвуковими**.

Продовжуватимемо поступово збільшувати частоту коливань. У цьому разі змінюватиметься фізіологічна характеристика звуку, яку називають **висотою тону**. Отже, *фізичній характеристиці звуку – частоті – відповідає фізіологічна характеристика – висота тону*. На малюнку 27 б, в наведено графіки звуків різної висоти тону. Частота звуку на малюнку 27, в більша, а отже, і вищий тон звуку.



Мал. 27. Коливання різних частот

35

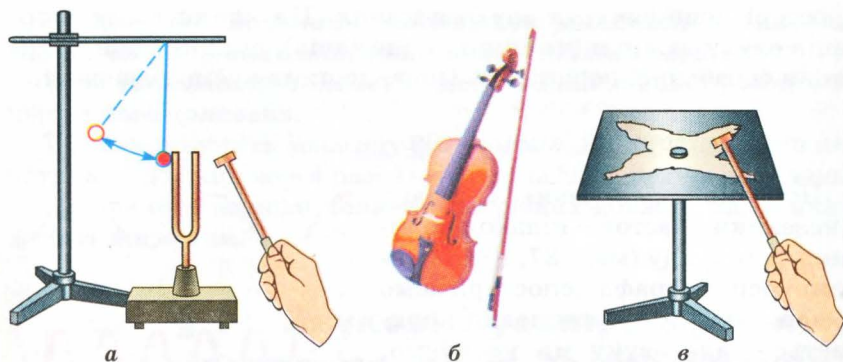
Ультразвуки

Якщо поступово збільшувати частоту звукових коливань, то висота тону зростатиме. З досягненням певної частоти ми вже не чуємо звуку, хоча коливання й досягають наших органів слуху. Людина перестає чути звуки, якщо частота їх перевищує 20 000 Гц. Для різних людей ця межа може бути різною. Звукові коливання, частота яких перевищує 20 кГц, називають **ультразвуковими**.

Отже, звуковими є коливання, частота яких знаходиться в межах 16–20 Гц – 20 кГц.

Деякі тварини, наприклад собаки і кажани, чують ультразвуки. Цю властивість використовують під час дресирування собак, а кажанам вона дає змогу орієнтуватися в просторі.

Не слід думати, що звуки можуть утворюватися лише в разі коливання твердих тіл: ніжок камертона, дифузора гучномов-

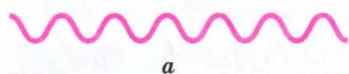


Мал. 28. Джерела звукових коливань:
а – камертона; б – струни; в – металевої пластинки

ця, струни тощо (мал. 28). Досить сильні звуки можна одержати і під час коливання повітря.

36

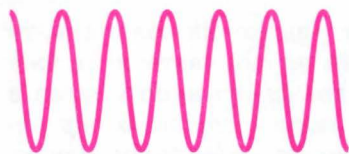
Візьміть невеличку трубку, закрийте один з її отворів і подміть біля другого отвору. Матимете свищик, який дає звук певної висоти тону. Якщо хочете змінити висоту тону звуку, вставте в трубку поршень. Тепер можна змінювати висоту стовпчика повітря в трубці й одержувати звук різної висоти тону. Встановіть залежність висоти тону звуку від висоти стовпчика повітря.



а



б



в

Мал. 29. Осцилограми
коливань різної
амплітуди

Так можна одержувати не лише звукові, а й інфра- та ультразвукові коливання, що й застосовують іноді в техніці.

Скориставшись генератором, гучномовцем і осцилографом, встановимо, від чого залежить гучність звуку. Якщо амплітуда коливань невелика (мал. 29, а), то й гучність звуку мала. Зі збільшенням амплітуди коливань (мал. 29, б, в) зростатиме й гучність звуку. Проте коли амплітуда коливань мала, то звуку можемо й не почути через не-

достатню чутливість органів слуху. Існує певний поріг чутності. Коли ж амплітуда звукових коливань велика, то звуки викликають больові відчуття.

Складні звуки

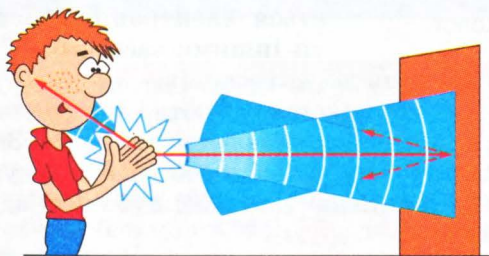
Досі ми розглядали лише прості звуки. Проте більшість звуків у природі є **складними**. Складний звук можна розкласти на ту чи іншу кількість простих звуків. Основним тоном складного звуку вважають найнижчий, який має найменшу частоту коливань. Складний звук має такий самий період коливань, як і основний тон. Інші прості тони, що входять до складного звуку і мають частоти, більші від частоти основного тону (в ціле число разів), називають **вищими гармонічними тонами**, або **обертонами**. Кількість і амплітуди вищих гармонічних тонів утворюють специфічне «забарвлення» звуку, яке характеризує поняттям **тембр звуку**.

Звук у повітрі поширюється зі швидкістю $331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ при температурі повітря 0°C , у водні (0°C) – $1286 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; вуглекислому газі (0°C) – $258 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Швидкість поширення звуку у воді (0°C) $1485 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Звук у твердих тілах поширюється зі швидкостями: у сталі $5100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; граніті $3950 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; дереві $4000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Кількість і амплітуди вищих гармонічних тонів визначають тембр звуку.



Луна

Звукові та ультразвукові хвилі в будь-яких середовищах поширюються з різними швидкостями і можуть відбиватися від різних перепон (луна) (мал. 30). Відбивання звукових та ультразвукових хвиль використовується в техніці. Це явище можна спостерігати і в живій природі.



Мал. 30. Луна

Застосування ультразвуку

Значення звукових коливань у житті людини загальновідоме. Не менш важливу роль відіграють у сучасній техніці та наукових дослідженнях й ультразвукові коливання. Ультразвукові методи почали широко застосовувати в хірургії, за допомогою ультразвукових коливань можна розрізати і з'єднувати кісткові тканини. Ультразвукові коливання широко використовуються для лікування хвороб.

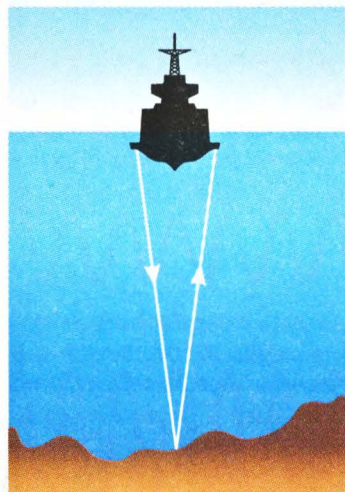


Ультразвуки ефективно можна використовувати в хірургії.

Ультразвукові хвилі, поширюючись у пружному середовищі, відбиваються від різних перешкод. Відбиті коливання можна вловити приладами. Знаючи швидкість їхнього поширення в певному

середовищі, досить просто визначити відстань до перешкоди. На цьому принципі ґрунтується дія ехолота, який уперше був сконструйований у 1918 р. П. Ланжевроном. На судні встановлюють ультразвуковий випромінювач, що посилає в певному напрямі імпульси ультразвукових коливань (мал. 31). Відбиті хвилі приймаються і підсилюються. Самопис автоматично наносить на паперову стрічку рельєф дна. Якщо на шляху поширення ультразвуку виявиться косяк риби, то ультразвук відіб'ється і від нього, і це можна відразу виявити.

Аналогічно працюють і ультразвукові дефектоскопи – прилади для перевірки якості різноманітних деталей, наприклад після зварювання. Якщо в деталі є тріщини, порожнини тощо, то в цьому місці ультразвук відіб'ється, що й фіксується електронним осцилографом чи іншими засобами. У техніці за-



Мал. 31. Ехолот

стосовуються різні типи дефектоскопів.

Ультразвук широко використовують і в технологічних процесах, наприклад під час виготовлення емульсій. За звичайних умов важко змішати ртуть і воду або олію і воду, а під дією ультразвукових коливань таке змішування здійснюється швидко й надійно.

Досить широко використовують також ультразвукові вимірювальні прилади: для визначення в'язкості рідин

(акустичні віскозиметри), витрати рідин у трубопроводах тощо.

Під дією інтенсивних ультразвукових коливань значно прискорюється перебіг деяких хімічних реакцій, що також застосовують у техніці.

Ультразвук став надійним помічником людини вже сьогодні, але дослідження можливостей його застосування тривають.

Аналогічно дії ехолота працюють ультразвукові дефектоскопи. Ультразвук широко застосовують у технологічних процесах. Досить широко використовують ультразвукові вимірювальні прилади: для визначення в'язкості рідин (акустичні віскозиметри), витрати рідин у трубопроводах тощо.



Хоч людина почала вивчати коливання досить давно, проте є такі галузі коливань, які ретельно досліджують лише останнім часом. Насамперед це стосується інфразвукових коливань, шкідливий вплив яких на людський організм виявили французькі вчені. Вони довели, що інфразвуки достатньої потужності з частотами 6–9 Гц можуть бути для людини навіть смертельними, оскільки внутрішні органи мають власні частоти коливань саме 6–9 Гц. Унаслідок дії на людину інфразвуку з відповідною частотою виникає резонанс, зростає амплітуда коливань тих чи інших органів, що може призвести до смерті. Дія на організм людини коливань різної природи і частоти вивчена ще недостатньо. Та й у техніці існує чимало проблем, пов'язаних із застосуванням коливань, а також з усуненням їхніх шкідливих проявів.

Ультразвук прискорює певні хімічні реакції. Інфразвукові коливання можуть справляти шкідливий вплив на організм людини.



1. Які коливання вважаються звуковими?
2. Які коливання вважаються інфразвуковими, а які – ультразвуковими?
3. Як пов'язані між собою фізичні характеристики звукових коливань (їх частота і амплітуда) з фізіологічними характеристиками (висотою тону і гучністю)?
4. Що таке тембр звуку?
5. Де застосовують ультразвук?

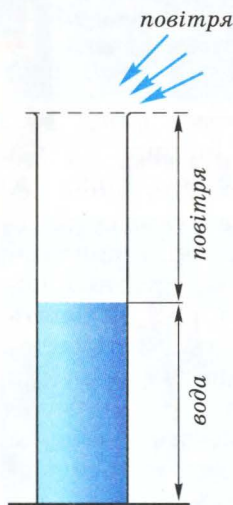


ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Вивчення характеристик звуку

Мета. Дослідити, як залежить висота тону (частота) коливань, які дає скляна пляшка з водою, від висоти рівня води в ній; як залежить висота тону коливань стовпа повітря над поверхнею води в пляшці від висоти цього стовпа.

Обладнання: 1. Дві скляні пляшки, одна з яких з чистою питною водою (або два мірних циліндри, або мірний циліндр і пляшка). 2. Металева чайна ложечка. 3. Лінійка з міліметровими поділками.



Виконання роботи

1. Легенько вдарте ложечкою по повній пляшці з водою і запам'ятайте висоту тону звуку, який при цьому виник. Тепер відлийте приблизно $1/5$ частину води в порожню пляшку і знову збудіть коливання в досліджуваній пляшці. Збільшилась чи зменшилась висота тону (частота коливань пляшки)?

Потім відлийте ще $1/5$ частину води і дослід повторіть. Зробіть висновок про зміну висоти тону звуку. Повторюйте дослід до того часу, поки пляшка стане порожньою.

Зробіть загальний висновок про залежність частоти коливань пляшки з водою від кількості води в ній (висоти стовпа рідини).

2. Подміть повітря з рота біля шийки порожньої пляшки так, щоб почалося гудіння стовпа повітря в пляшці. Запам'ятайте висоту тону звуку. Тепер налийте в пляшку $1/5$ її об'єму води (приблизно). Викличте гудіння стовпа повітря. Порівняйте висоту тону звуку з попередньою. Зробіть висновок. Далі доливайте воду в пляшку і викликайте звучання стовпа повітря.

Зробіть загальний висновок про залежність висоти тону звуку (частоти коливань) стовпа повітря в пляшці від його висоти.

3. Вдома можна виконати досліди з іншими посудинами (наприклад, від ліків, одеколону тощо).

4. Знайдіть металеву чи скляну трубочку і приладняйте до неї дерев'яний поршень. Подміть біля вільного кінця трубочки – одержали свисток. Дослідіть, як залежить висота тону звуку свистка від висоти стовпа повітря в ньому. Висновок запишіть.

Цю роботу учні можуть виконати вдома. Але результати роботи варто обговорити в класі (після роботи) з відповідною демонстрацією дослідів.

Головне в розділі 1

- Зміна положення тіла в просторі називається механічним рухом.

- Механічний рух відносний. Характеристики руху залежать від вибору тіла відліку.

- Кожна точка тіла, що перебуває в русі, описує лінію, яка називається траєкторією.

- Траєкторії можуть мати різну форму. Тому розрізняють прямолінійний і криволінійний рухи.

- Вид траєкторії залежить від вибору тіла відліку. Форма траєкторії відносна.

- Рух відбувається в просторі й часі.

- Рух тіла в просторі характеризує шлях – довжина траєкторії.

- Рух тіла в часі характеризує швидкість – фізична величина, яка чисельно дорівнює шляху, пройденому тілом за одиницю часу.

- Одним із видів механічного руху є обертовий, при якому точки тіла описують колові траєкторії.

- Обертовий рух характеризується частотою і періодом обертання.

- Коливальний рух характеризується амплітудою, частотою і періодом коливань.

- Звук – це механічні коливання відповідних частот, які поширюються в пружних середовищах.

- У повітрі звук поширюється зі швидкістю в середньому 331 м/с.

- Гучність звуку залежить від амплітуди коливань, а висота тону – від їх частоти.

- Вухом людини сприймає коливання частотою від 16 Гц до 20 кГц.

- Інфразвуки й ультразвуки знаходять застосування в медицині й техніці.



Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- способи вимірювання сили, одиниці сили і тиску;
- умови рівноваги тіл, закони Гука, Паскаля, Архімеда;
- що таке маса і вага тіла, сила тяжіння і вага.

Ви зможете **пояснити**:

- прояви механічної взаємодії, виникнення сили пружності;
- залежність атмосферного тиску від висоти;
- властивості твердих тіл, способи збільшення і зменшення тертя.

Ви будете **вміти**:

- користуватися динамометром, манометром, барометром;
- розв'язувати задачі, використовуючи закони Гука, Паскаля, Архімеда.



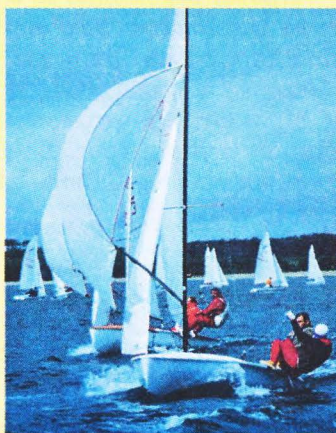
§ 13. Взаємодія тіл. Сила

Чому тіла змінюють свій стан у просторі

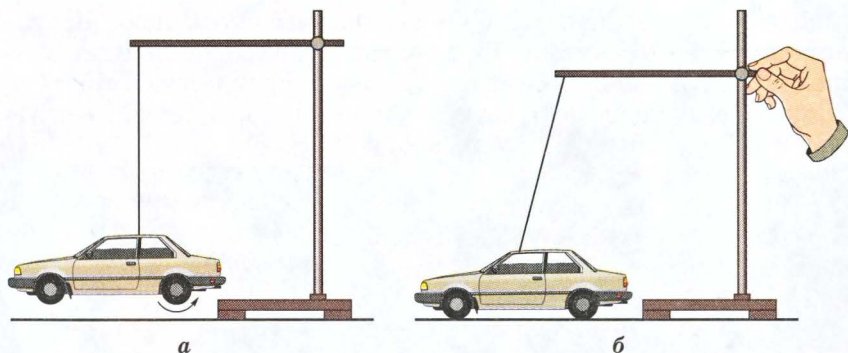
Будь-які зміни в природі відбуваються внаслідок взаємодії між тілами. Щоб змінити положення вагона на рейках, залізничники спрямовують до нього локомотив, який зміщує вагон з місця і приводить його в стан руху (мал. 32). Вітрильник може тривалий час стояти біля берега, аж доки не подме попутний вітер і подіє на його вітрила (мал. 33). Колеса



Мал. 32. Поїзд рухається внаслідок дії локомотива на вагони



Мал. 33. Вітрильник рухається внаслідок дії вітру



Мал. 34. Зміна стану тіла можлива лише при взаємодії

44

іграшкового автомобіля можуть обертатися з будь-якою швидкістю, але іграшка не змінить свого положення, якщо під іграшку не підкласти дощечку або лінійку (мал. 34). Форму чи розмір пружини можна змінити, лише підвісивши до неї тягарець або потягнувши рукою за один з її кінців.

Усі тіла в природі так чи інакше пов'язані між собою і діють одне на інше або безпосередньо, або через фізичні поля. Така дія завжди є взаємною. Якщо тепловоз діє на вагон і змінює його швидкість, то швидкість тепловоза при цьому також змінюється внаслідок зворотної дії вагона. Сонце діє на всі тіла на Землі і на саму Землю, утримуючи її на орбіті. Але і Земля притягує Сонце і в свою чергу змінює його траєкторію. Отже, в усіх випадках можна говорити лише про взаємну дію тіл – взаємодію.

При взаємодії можуть змінюватися швидкості тіл або їх частин.

Проте, взаємодіючи з різними тілами, дане тіло по-різному буде змінювати свою швидкість. Так, вітрильник може набути швидкості внаслідок дії на нього вітру. Але такого самого результату можна досягти, увімкнувши двигун, розміщений на вітрильнику. Його може зрушити з місця і катер, діючи на вітрильник через трос. Щоб не називати щоразу всі взаємодіючі тіла, чи тіла, які діють на дане тіло, всі ці дії об'єднують одним поняттям сили.



Сила – це фізичне поняття, яке узагальнює всі взаємодії, внаслідок яких тіло чи його частини змінюють свій стан.

Що таке сила

Сила як фізичне поняття може бути більшою чи меншою, як і ви-кликани нею зміни в стані тіла чи його частин.

Дія тепловоза на вагон буде значно інтенсивнішою, ніж дія декількох вантажників. Під дією тепловоза вагон швидше зрушить з місця і почне рухатися з більшою швидкістю, ніж тоді, коли вагон будуть штовхати вантажники, які ледве змістять вагон на невелику відстань або й зовсім не зрушать його.

Для того щоб можна було вести математичні розрахунки, силу позначають певною літерою. Як правило, це латинська літера F .

Як і всі інші фізичні величини, сила має певні одиниці. Сучасна наука користується одиницею, яка називається ньютон (Н). Одиниця дістала таку назву на честь англійського вченого Ісаака Ньютона, який зробив значний внесок у розвиток фізичної і математичної науки.

Сила як фізична величина кількісно характеризує дію одного тіла на інше.



Ісаак Ньютон (1643–1727) – видатний англійський учений, засновник класичної фізики. Наукові праці стосуються механіки, оптики, астрономії та математики. Сформулював основні закони класичної механіки, відкрив закон всесвітнього тяжіння, дисперсію світла, розвинув корпускулярну теорію світла, розробив диференціальне та інтегральне числення.



45

Сили можуть мати різні значення. Так, на склянку з водою діє сила з боку Землі, що приблизно дорівнює 2 Н. А трактор, тягнучи плуга, діє на нього із силою в декілька тисяч ньютонів.

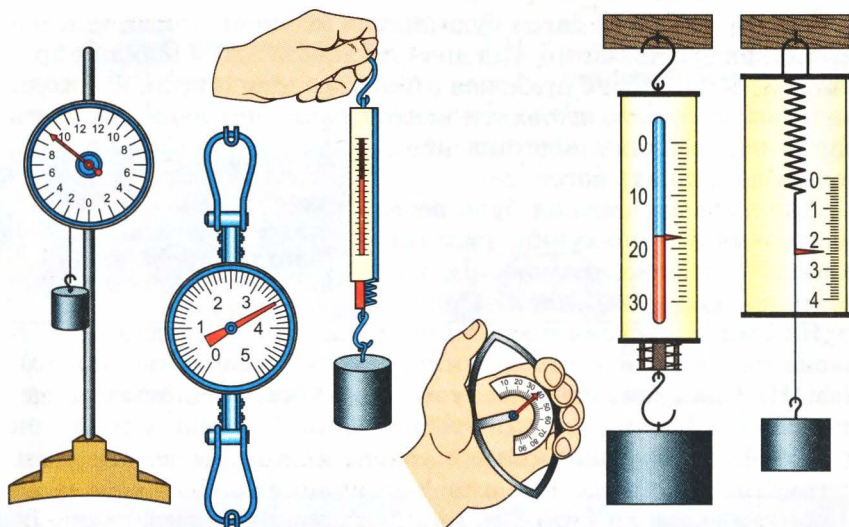
Чим вимірюють силу

Для вимірювання сили використовують спеціальні прилади, які називаються **динамометрами** (dina – *сила*; metro – *міряю*). Як правило, кожен такий прилад має вимірний елемент у вигляді пружини певної форми (мал. 35).

Сила характеризується напрямом

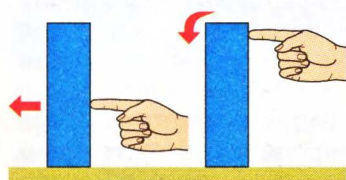
Вказати числове значення сили не завжди достатньо для визначення результату її дії. Важливо знати точку її прикладання та напрям дії.

Якщо високий брусок, що стоїть на столі, штовхати в нижній частині, то він буде ковзати поверхнею стола. Якщо ж до нього прикласти силу у верхній його частині, то він просто перекинеться (мал. 36).

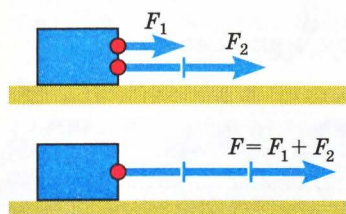


Мал. 35. Різні типи динамометрів

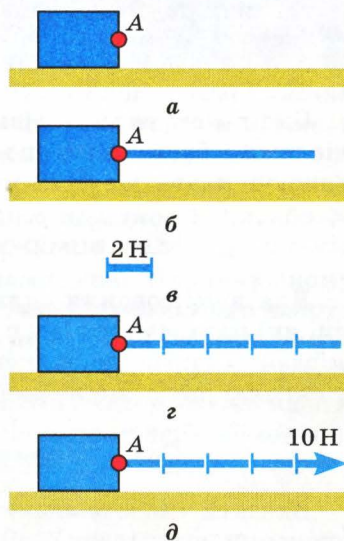
46



Мал. 36. Результат дії сили залежить від точки її прикладання



Мал. 38. Рівнодійна сил, які діють в одному напрямі



Мал. 37. Графічне зображення сили

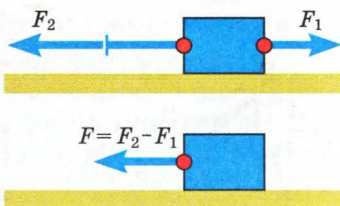
Зрозуміло, що напрям падіння бруська залежить від того, в якому напрямі будемо його штовхати. Отже, сила має також напрям. Від напрямку сили залежить зміна швидкості тіла, на яке ця сила діє.

Враховуючи, що сила має напрям і числове значення, її зображають у вигляді стрілки певної довжини і напрямку (вектора). Така стрілка починається в точці на тілі, яка називається точкою прикладання сили. На малюнку 37 зображена сила, значення якої дорівнює 10 Н, напрямлена вона зліва направо і прикладена в точці А.

Користуючись графічним методом, можна проводити різні математичні операції із силами. Так, якщо до однієї точки на тілі прикладені сили 2 Н і 3 Н, які діють в одному напрямі, то їх дію можна замінити однією силою, яка буде прикладена в цій самій точці, діятиме в тому ж напрямі, а її значення дорівнюватиме сумі значень кожної із сил (мал. 38). Вектор цієї сили матиме довжину, що дорівнює сумі довжин обох векторів.

Можливий інший випадок, коли сили прикладені в одній точці тіла, але діють у протилежних напрямках. Тоді їх можна замінити однією силою, напрямленою в напрямі більшої сили, а її значення дорівнюватиме різниці значень кожної сили (мал. 39). Довжина вектора цієї сили дорівнюватиме різниці довжин векторів прикладених сил.

Сила, якою можна замінити кілька сил, прикладених у певній точці тіла, називають *рівнодією*.



Мал. 39. Рівнодіяна сил, що діють у протилежних напрямках

Рівнодіяна – це сила, дія якої рівнозначна дії кількох сил, прикладених до тіла в даній його точці.



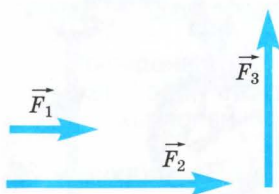
1. Як можна змінити механічний стан тіла?
2. Для чого вживають поняття сили?
3. Що таке сила?
4. Яка основна одиниця сили?
5. Яким приладом вимірюють силу?
6. Які властивості сили?
7. Яку силу називають рівнодієюною?
8. Яка буде рівнодіяна двох сил, які діють уздовж однієї прямої в одному напрямі?
9. Яка буде рівнодіяна сил, які діють уздовж однієї прямої в протилежних напрямках? Який її напрям?



Вправа 5

1. Зобразити графічно дві сили 50 Н і 20 Н, які прикладені в одній точці і діють під кутом 90° одна до одної.

2. На малюнку 40 зображено силу F_1 , яка дорівнює 20 Н. Користуючись нею як масштабом, знайти значення сил F_2 і F_3 .



Мал. 40. До вправи 5

3. Великий залізничний поїзд інколи ведуть два локомотиви. Яку силу має прикласти до поїзда один, більш потужний локомотив, якщо перший локомотив діє на поїзд із силою 180 кН, а другий – із силою 100 кН?

4. На тіло вздовж однієї прямої діють сили, що дорівнюють 2 Н, 3 Н, 4 Н. Позначивши в зошиті точку прикладання цих сил, покажіть напрям сил для випадків, коли рівнодійна буде дорівнювати 1 Н, 3 Н, 5 Н відповідно.

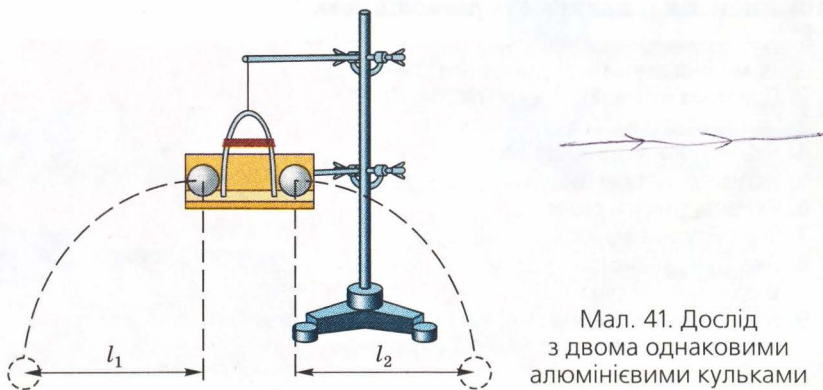
5. Чи може рівнодійна двох сил 4 Н і 5 Н, які діють на тіло вздовж однієї прямої, дорівнювати 2 Н, 3 Н, 9 Н, 10 Н?

§ 14. Інертність тіл. Маса

Чи завжди однаковий результат дії сили

Результатом дії сили на тіло є зміна його швидкості або форми. Проте дія однієї і тієї самої сили не завжди супроводжується однаковим ефектом. Він буде залежати і від властивостей тіла, до якого прикладено силу.

Розмістимо на полиці, закріпленій у штативі, дві алюмінієві кульки (мал. 41). Пружну пластинку зігнемо, її кінці зв'яжемо ниткою і введемо між кульки. Якщо нитку перерізати, то пластинка розпрямиться і штовхне обидві кульки, на-



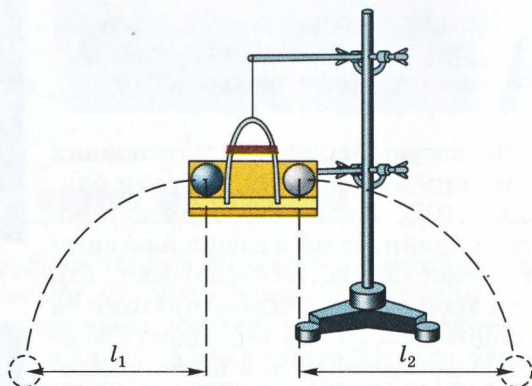
Мал. 41. Дослід з двома однаковими алюмінієвими кульками

давши їм певних швидкостей. Вимірявши відстані l_1 і l_2 , на які відлетіли кульки, побачимо, що вони однакові:

$$l_1 = l_2.$$

Якщо дослід повторити, замінивши одну з алюмінієвих кульок сталюю кулькою такого самого діаметра (мал. 42), то відстані, на які змістилися кульки, будуть різними:

$$l_1 < l_2.$$



Мал. 42. Дослід з алюмінієвою і сталюю кульками

49

Отже, при дії однієї й тієї самої стиснутої пружини за один і той самий інтервал часу кульки набули різних швидкостей. Більша зміна швидкості спостерігалася в алюмінієвій кульки. Швидкість же сталюї кульки змінювалася менше. З огляду на подібні явища одні тіла називають більш інертними (у нашому досліді – сталюа кулька) і менш інертними (алюмінієва кулька).

Інертність – це властивість тіла більше або менше зберігати свій стан руху під дією однакових сил.



Що таке маса

Для кількісного вираження інертності користуються фізичною величиною, яку називають *масою*.

Очевидно, що маса кульки зі сталі в попередньому досліді була більшою, ніж алюмінієвої. Тому вони і набули різних швидкостей.

Маса – це фізична величина, яка характеризує інертні властивості тіла.



Одиниці вимірювання маси

Як і будь-яка фізична величина маса має одиницю. Основною одиницею маси є кілограм (кг).

Кілограм є одиницею маси і дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.



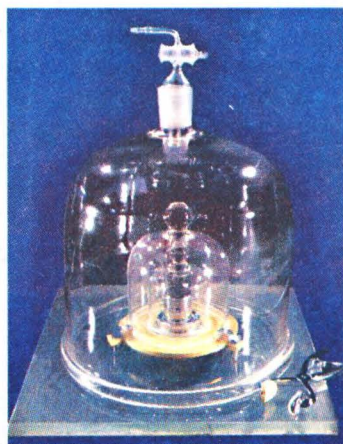
Якщо тіло має масу 1 кг, то під дією сили 1 Н його швидкість щосекунди змінюється на 1 м/с.

Кілограм належить до основних одиниць Міжнародної системи одиниць (СІ). За одиницю маси кілограм прийнята маса спеціально виготовленого зразка (еталона) (мал. 43). Він зроблений зі сплаву платини та іридію і має форму циліндра. Зберігається еталон маси в Міжнародному бюро мір і ваги в м. Севрі, що під Парижем.

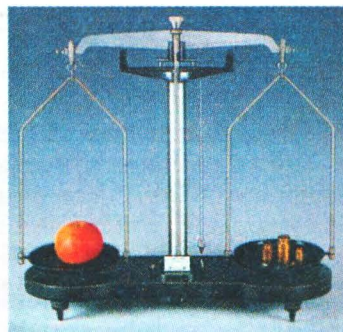
Як і для інших одиниць вимірювання, для кілограма застосовують похідні одиниці:

$$\begin{aligned} 1 \text{ г} &= 0,001 \text{ кг} = 10^{-3} \text{ кг}; \\ 1 \text{ мг} &= 0,000001 \text{ кг} = 10^{-6} \text{ кг}; \\ 1 \text{ т} &= 1000 \text{ кг} = 10^3 \text{ кг}; \\ 1 \text{ ц} &= 100 \text{ кг} = 10^2 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Для прямого вимірювання маси застосовують різні терези. Серед них найпоширеніші і найпростіші – важільні (мал. 44). На цих терезах порівнюють взаємодію із Землею тіла й еталонних важків, покладених на шальки терезів. На практиці застосовують також інші терези, які пристосовані до різних умов роботи і мають різні конструкції.



Мал. 43. Еталон кілограма



Мал. 44. Лабораторні важільні терези



1. Чи однаково змінюються швидкості тіл однакової маси під дією різних сил?
2. Що таке інертність? Якою фізичною величиною характеризують інертні властивості тіл?
3. Що таке маса? Які одиниці маси?
4. За допомогою якого приладу вимірюють масу?

Вправа 6

1. Маса однієї кулі дорівнює 6 кг, а другої – 0,017 кг. Яку кулю важче зупинити, якщо вони котяться з однаковими швидкостями гладенькою горизонтальною поверхнею?

2. Водій вантажного автомобіля, побачивши червоний сигнал світлофора, натискує на гальма раніше, ніж водій легкового автомобіля, який рухається поруч з такою самою швидкістю. Чому?

3. На кожне з двох тіл, що рухалися з однаковою швидкістю гладенькою поверхнею, подіяла сила 10 Н. Одне з них зупинилося через 20 с, а друге – через 5 с. Яке з цих тіл має більшу масу?

§ 15. Густина речовини

Якщо на шальки терезів покласти алюмінієві циліндри однакового об'єму, то рівновага терезів не порушиться. Це свідчить, що їхні маси однакові. Рівність мас покажуть терези і тоді, коли на обидві шальки терезів покласти тіла однакового об'єму з олова, деревини або свинцю. Отже, якщо тіла мають однакові об'єми і виготовлені з однієї і тієї самої речовини, то їхні маси будуть однакові.

Однак рівновага терезів порушиться, якщо на одну шальку терезів покласти алюмінієвий циліндр, а на другу – такого самого об'єму свинцевий циліндр. Рівновагу можна відновити, поклавши на шальку з алюмінієвим циліндром додаткові важки або зменшивши об'єм свинцевого циліндра майже в 5 разів. Відношення об'ємів двох тіл однакової маси з різних речовин завжди буде різним і залежатиме від роду речовини кожного тіла.

Для порівняння відношення маси до об'єму різних тіл використовують фізичну величину, яку називають *густиною*.

Що таке густина

Густина однорідної речовини – фізична величина, що визначається відношенням маси речовини до її об'єму.



Відповідно до означення для визначення густини речовини потрібно масу однорідного тіла з цієї речовини поділити на його об'єм:

$$\text{густина} = \frac{\text{маса}}{\text{об'єм}}.$$

Позначивши густину грецькою літерою ρ («ро»), масу – латинською літерою m , а об'єм латинською літерою V , одержимо формулу

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

Для прикладу визначимо густину латуні, якщо суцільний латунний циліндр має масу 1,7 кг і об'єм 0,02 м³.

Дано:

$$V = 0,02 \text{ м}^3,$$

$$m = 1,7 \text{ кг}.$$

$\rho = ?$

Розв'язання

За означенням $\rho = \frac{m}{V}$. Підставивши значення маси і об'єму, отримаємо:

$$\rho = \frac{1,7 \text{ кг}}{0,02 \text{ м}^3} = 8500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Відповідь. Густина латуні 8500 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

52

З цього прикладу видно, що одиницею густини є кілограм на кубічний метр $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$. Часто застосовують одиницю грам на кубічний сантиметр. Між ними існує однозначний зв'язок:

$$1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \frac{1000 \text{ г}}{1\,000\,000 \text{ см}^3} = 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Для всіх речовин густина визначена і відображена в спеціальних таблицях. Читаючи ці таблиці, можна дізнатися, яку масу має одиниця об'єму певної речовини.

Таблиця 1

Густина різних речовин

Речовина	Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Тверді тіла (за температури 20 °C)	
Алюміній	2700
Графіт	2300–2700
Деревина дуба	800
Залізо	7800
Золото	19 300
Іридій	22 400

Продовження табл. 1

Речовина	Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Тверді тіла (за температури 20 °С)	
Латунь	8400–8700
Лід (при 0 °С)	880–920
Сталь	7600–7900
Нікель	8900
Олово	7300
Парафін	870–910
Платина	21 500
Свинець	11 300
Срібло	10 500
Скло	2200–2800
Рідини (за температури 20 °С)	
Вода	998,2
Нафта	800
Спирт етиловий	789,4
Ртуть	13 546
Гази (за температури 0 °С і тиску 760 мм рт. ст.)	
Азот	1,25
Гелій	0,18
Водень	0,09
Кисень	1,43
Повітря (сухе)	1,293

Якщо при розв'язуванні задачі знайдено певне значення густини, то за таблицею можна визначити, з якої речовини виготовлене це тіло.

Для неоднорідних тіл користуються поняттям середньої густини, коли враховується загальна маса тіла та його об'єм, незалежно від того, чи є в тілі порожнини. У цьому разі за середньою густиною не можна визначити речовину тіла,

але можна передбачити результати його взаємодії з іншими тілами.



1. Чи всі однорідні тіла однакової маси мають однаковий об'єм?
2. Чи всі однорідні тіла однакового об'єму мають однакову масу?
3. Що таке густина речовини?
4. Які одиниці густини?
5. Як визначити об'єм однорідного тіла неправильної форми, якщо відома його речовина?
6. Як розрахувати масу однорідного тіла, виготовленого з відомої речовини?
7. Як визначити об'єм однорідного тіла, виготовленого з відомої речовини?

Вправа 7

54

1. З двох однорідних тіл однакового об'єму маса другого тіла в 7 разів менша, ніж маса першого. У якого тіла густина речовини більша і в скільки разів?

2. Об'єм шматка металу дорівнює 50 см^3 , а його маса – 355 г. Яка густина цього металу? Який метал має таку густину?

3. Яка густина рідини, якщо маса 125 л дорівнює 100 кг?

4. Із двох однорідних тіл однакової маси об'єм першого тіла втричі більший, ніж об'єм другого тіла. Речовина якого тіла, взята в об'ємі 1 м^3 , має меншу масу і в скільки разів?

5. Обчислити масу однорідного тіла, об'єм якого дорівнює 250 см^3 , а густина речовини, з якої його виготовлено, дорівнює $1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. Об'єм суцільного залізного предмета 750 дм^3 . Яка його маса?

7. Об'єм внутрішнього простору цистерни становить 60 м^3 . Скільки тонн нафти можна в неї залити?

8. Паливний бак автомобіля з нормальним наповненням містить 70 кг бензину. Визначити об'єм бака в літрах.

9. Назвати дві різні тверді речовини й такі їхні об'єми, щоб маси цих тіл були однакові.

10. У скільки разів об'єм, який займає ртуть, менший за об'єм нафти такої самої маси?

§ 16. Сила тяжіння

Усі тіла біля Землі падають на її поверхню, якщо їх ніщо не утримує від цього. Яка ж причина такого явища?

Чому тіла падають на Землю

Розглянемо фотознімок падіння кульки, на якому положення кульки фіксувалося на плівці через однакові інтервали часу (мал. 45). Якщо лінійкою виміряти відстані між зображеннями кульки в різні моменти часу, то можна помітити, що ці відстані поступово збільшуються. Це свідчить про те, що і швидкість кульки при падінні поступово збільшується.

Рух тіла, що падає, нерівномірний

Якщо пригадати означення сили, за яким сила змінює швидкість тіла, то можна зробити висновок, що на кульку діє сила, напрямлена до Землі.

Силу, яка діє на кожне тіло з боку Землі, називають силою тяжіння.



Мал. 45.
Прискорений
рух кульки,
що падає

Вимірювання показують, що швидкість тіла, яке падає на поверхню Землі за відсутності опору повітря, збільшується щосекунди приблизно на $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Як розрахувати силу тяжіння

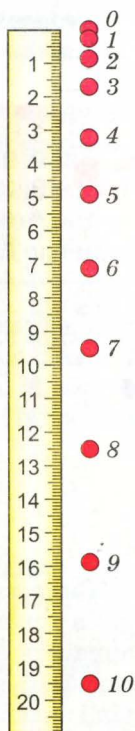
Силу тяжіння можна розрахувати, знаючи масу тіла. Спосіб такого розрахунку підказують результати дослідів.

Якщо взяти динамометр і підвісити до нього важок масою 102 г, то стрілка динамометра зупиниться біля поділки 1 Н. Якщо підвісити два таких важки, то динамометр покаже силу 2 Н і т. д. З цього дослідів можна зробити висновок, що сила тяжіння пропорційна масі тіла.

Сила тяжіння пропорційна масі тіла.

$$F_{\text{тяж}} = gm.$$

Коефіцієнт пропорційності g приблизно дорівнює $9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.



Для розрахунків під час розв'язування задач іноді приймають

$$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}.$$

Знаючи таку залежність сили тяжіння від маси, можна задалегідь розрахувати її значення.

Наприклад, потрібно визначити, що покаже динамометр, якщо до його гачка підвісити важок масою 500 г.

Дано:

$$m = 500 \text{ г.}$$

$F_{\text{тяж}} - ?$

Розв'язання

$$F_{\text{тяж}} = gm,$$

$$F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ Н/кг} \cdot 0,5 \text{ кг} = 4,9 \text{ Н.}$$

Відповідь. Стрілка динамометра покаже 4,9 Н.

Яка природа сили тяжіння

56

Сила тяжіння є проявом загальноприродного закону, який діє в усьому Всесвіті. Відкритий і сформульований у XVII ст. англійським фізиком Ньютоном, він стверджує, що сила гравітаційної взаємодії у Всесвіті пропорційна масам взаємодіючих тіл і залежить від відстані між ними.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2},$$

де R – відстань між тілами.

Сила тяжіння, як прояв гравітаційної взаємодії на Землі, є наслідком взаємодії усіх тіл із Землею. Тому в розрахунках сили тяжіння користуються лише масою даного тіла. Характеристики Землі відображені в узагальненій формі в коефіцієнті g .



1. Як виявляється явище тяжіння?
2. Що характеризує сила тяжіння?
3. Як розрахувати силу тяжіння?
4. Яким законом описується сила тяжіння?
5. З іменем якого вченого пов'язане вивчення явища тяжіння?

Вправа 8

1. Яка сила спричинює рух крапель до Землі?
2. Яка маса суцільної латунної кулі, якщо динамометр, до гачка якого вона підвішена, показує 49 Н?
3. Як зміняться покази динамометра, до якого підвішена свинцева куля, якщо їх перенести на Місяць?

4. У відро, підвішене до динамометра, рівномірним струменем вливається вода. Зобразити на графіку зміну показів динамометра з часом, якщо власна маса відра 2 кг.

5*. У вершинах рівностороннього трикутника розміщено три кулі різної маси. Між якими кулями сила взаємодії найбільша?

§ 17. Деформація тіл

Однією з ознак твердих тіл є властивість зберігати свою форму тривалий час. Проте така властивість спостерігається лише тоді, коли на тіло не діють інші тіла. А взаємодіючи з іншими тілами, вони змінюють свою форму. Ця зміна не завжди помітна, але вона завжди існує.

Що таке деформація

Явище деформації підлягає дії певних законів. Один з таких законів можна проілюструвати в досліді. Підвісимо на штативі гумову нитку і виміряємо її довжину. Підвісимо до нитки важок певної маси і побачимо, що він почне опускатися вниз, розтягуючи нитку. Швидкість його буде зменшуватися і він врешті-решт зупиниться, а довжина нитки буде більша за початкову. За результатами досліді можна зробити висновок, що при деформації нитки виникла сила, напрямлена в бік, протилежний до деформації.

Цю силу назвали *силою пружності*.

Зміну форми чи розмірів тіла називають деформацією.



Силу, яка виникає при деформації, називають силою пружності.



Як розрахувати силу пружності

Силу пружності можна розрахувати, якщо відома деформація тіла. Якщо початкову довжину нитки позначити літерою l_0 , а довжину після розтягу – l , то зміна довжини нитки дорівнюватиме

$$\Delta l = l - l_0.$$

У попередньому досліді додамо ще один важок. Нитка розтягнеться більше. Якщо виміряємо зміну довжини нитки для цього випадку, то помітимо, що вона стала вдвічі більшою, ніж

до цього. Така закономірність властива для всіх випадків незначної деформації тіл і відображає дію закону Гука.

Який зміст закону Гука

Математично ця залежність записується так:

$$F_{\text{пр}} = k \Delta l.$$

Тут $F_{\text{пр}}$ – сила пружності; Δl – деформація тіла; k – коефіцієнт пружності.

Сила пружності пропорційна деформації тіла і спрямована завжди в протилежному до деформації напрямі.

Закон Гука можна проілюструвати за допомогою графіка (мал. 46). На ньому залежність сили пружності від деформації зображена прямою лінією, оскільки сила пропорційна деформації. На малюнку показано залежність сили пружності від деформації для двох різних тіл.

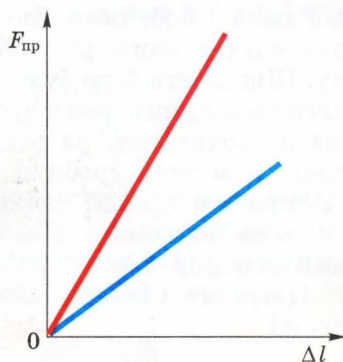
58 Графіки є прямими лініями, але мають різний нахил, що свідчить про різне значення коефіцієнта пружності для різних тіл.

Закон Гука справедливий для таких деформацій, після яких тіло знову набуває попередніх розмірів і форми. Такі деформації називають пружними.

Яка природа сил пружності

Виникнення сили пружності пов'язане із силами взаємодії між молекулами. При деформації змінюється відстань між молекулами, а тому переважають або сили притягання (при розтягуванні тіла), або сили відштовхування (при стисканні тіла).

Сили пружності враховують і використовують в різних технічних пристроях і машинах. Автомобілі, залізничні вагони, мотоцикли та інші транспортні засоби мають ресори. Їх застосування дає змогу зробити рух значно плавнішим, оскільки наїзд колеса на камінь або іншу перешкоду приводить лише до деформації ресори і відчутно не змінює положення самого транспортного засобу.



Мал. 46. Сила пружності пропорційна деформації



У країнах, де часто бувають великі землетруси, будинки ставлять на спеціальні пружини, які під час поштовху деформуються, а споруда залишається майже нерухомою.

1. Що таке деформація тіла?
2. Коли виникає деформація тіла?
3. Коли виникає сила пружності?
4. Як довести, що при деформації тіла виникає сила пружності?
5. Від чого залежить значення сили пружності?
6. Як формулюється закон Гука?
7. За яких умов справджується закон Гука?

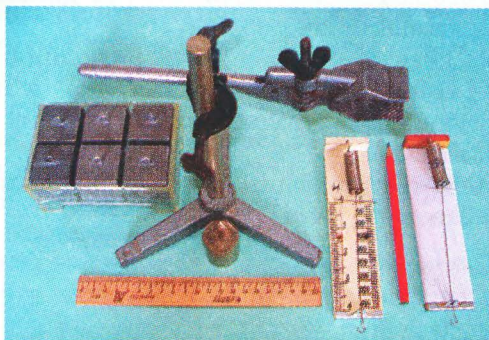
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Градуювання шкали динамометра

Мета. Дослідити залежність сили пружності від деформації і виготовити шкалу динамометра.

Обладнання: лабораторний динамометр із закритою чистим папером шкалою, штатив, лабораторний набір важків масою по 100 г, олівець, лінійка, лабораторний динамометр з відкритою шкалою, тіло невідомої маси.

59



Вказівки до роботи

Виготовлення будь-якого вимірювального приладу завжди пов'язане з градуванням його шкали – нанесенням поділок, за якими визначається значення вимірюваної величини.

Динамометр – це прилад для вимірювання сили. Тому для градування його шкали потрібно виміряти певні значення сили, які заздалегідь відомі. У цьому випадку зручно скористатися відомим фактом, що на тіло масою 102 г діє сила тяжіння 1 Н.

Підвішуючи до пружини один, два, три і т. д. таких важки, можна на шкалі біля пружини позначити положення стрілки, які відповідають її розтягу під дією сил 1 Н, 2 Н, 3 Н і т. д. Дрібніші поділki можна дістати, розбиваючи відстані між поділками на менші частини.

У межах достатньої точності можна скористатися важками промислового виготовлення масою 100 г.

Виконання роботи

1. Закріпіть у штативі корпус динамометра із закритою шкалою у вертикальному положенні.

2. Горизонтальною рисою позначте на папері початкове положення стрілки і поставте цифру 0.

3. Підвісьте до гачка на пружині важок масою 100 г.

4. Позначте на папері положення стрілки і поставте цифру 1.

5. Повторіть п. 3, 4 для двох, трьох і чотирьох важків.

6. Виміряйте відстані між сусідніми рисками на папері і висновок запишіть у зошит.

7. Проміжки між поділками поділіть на 10 рівних частин, позначивши їх короткими рисками.

8. До гачка виготовленого таким чином динамометра приєднайте лабораторний динамометр з фабричною шкалою і прикладіть до нього деяку силу. Покази обох динамометрів порівняйте і висновки запишіть у зошит.

9. До гачка виготовленого динамометра підвісьте важок невідомої маси і виміряйте силу тяжіння, яка діє на нього.

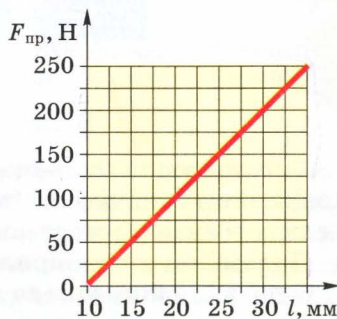
10. Користуючись результатами вимірювань за п. 9, розрахуйте масу важка.

11. Результати вимірювань і розрахунків запишіть у зошит, а шкалу додайте до звіту.

Вправа 9

1. Чому пружини для динамометрів виготовляють зі сталі, а не з міді чи олова?

2. На малюнку 47 зображено графічну залежність між довжиною пружини і силою пружності. Яка початкова довжина пружини? Яка деформація пружини, якщо сила пружності дорівнює 100 Н? Якою має бути довжина пружини, щоб сила пружності дорівнювала 325 Н?



Мал. 47

3. З видовженням пружини на 0,12 м виникла сила пружності 0,04 Н. На скільки потрібно видовжити пружину, щоб сила пружності дорівнювала 1 Н?

4. У нерозтягнутому стані довжина пружини була 88 мм. Внаслідок її видовження до 120 мм виникла сила пружності 120 Н. Якою має бути довжина пружини, щоб сила пружності дорівнювала 90 Н?

§ 18. Вага тіла

Багато тіл на Землі перебувають у стані спокою відносно її поверхні. Чому ж тіла, на які завжди діє сила тяжіння, не змінюють свого положення і швидкості під дією цієї сили?

Відповідь на запитання знайдемо під час проведення досліду. З цією метою покладемо лінійку на дві підставки і поставимо на неї важок (мал. 48). Лінійка деформується. Отже, важок подіє на лінійку і змінив її форму, деформував. А при деформації виникла сила пружності, яка зрівноважила силу тяжіння, і важок припинив рух до Землі.

Закріпимо на штативі гумову нитку, а до її кінця прикріпимо кульку. Якщо відпустимо кульку, то вона почне рухатися вниз і розтягуватиме нитку, доки сила пружності не зрівноважить силу тяжіння.

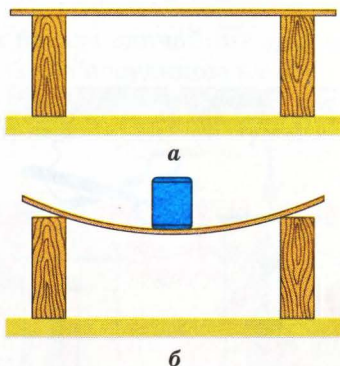
В обох випадках на важок і кульку діяла сила тяжіння, а тому вони, у свою чергу, діяли на лінійку чи гумову нитку.

Що таке вага тіла

Вага залежить від механічного стану тіла. Якщо воно нерухоме відносно опори або підвісу чи рухається рівномірно і прямолінійно, то вага за значенням і напрямом збігається із силою тяжіння.

Тому для цього випадку можна записати, що

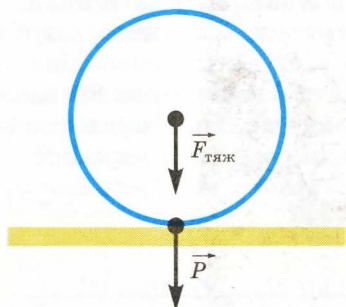
$$P = F_{\text{тяж}}; \quad P = gm.$$



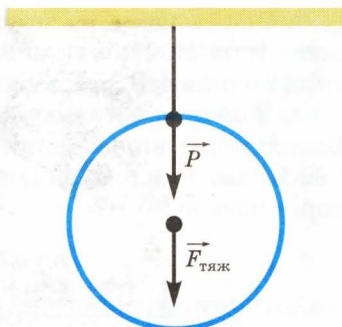
Мал. 48. Під дією важка лінійка деформується

Силу, з якою тіло діє на опору або підвіс, називають вагою.



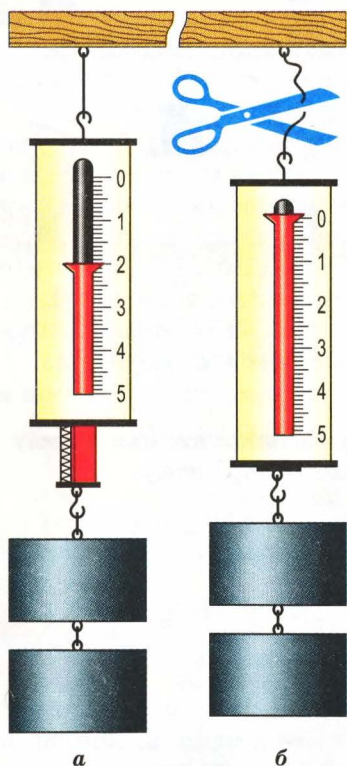


Мал. 49. Сила тяжіння прикладена до тіла, а вага – до опори



Мал. 50. Сила тяжіння прикладена до тіла, а вага – до підвісу

62



Мал. 51. Падіння динамометра з важками

Проте між цими силами є і суттєві відмінності. Зокрема, вони прикладені до різних тіл. Якщо сила тяжіння прикладена до даного тіла, то вага прикладена до опори чи підвісу (мал. 49, 50).

Відмінності виявляються і тоді, коли тіло і опора вільно падають під дією сили тяжіння. У цьому випадку вага зникає і настає стан невагомості.

Таку особливість ваги можна спостерігати в порівняно простих дослідах. Підвісимо на нитці, закріпленій у штативі, металевий динамометр, до гачка якого причеплено важки. Стрілка покаже певне значення ваги важків. Тепер переріжемо нитку – динамометр з важками почне падати. У момент падіння стрілка динамометра зміститься на поділку «нуль» (мал. 51). Отже, при вільному падінні тіла вага зникає, настає стан невагомості.

Невагомість відчують пілоти і космонавти. Якщо космічний корабель рухається навколоземною орбітою, то він весь час наче падає на Землю і всі тіла в його кабіні втра-



Мал. 52. Невагомість у космічному кораблі, який знаходиться на навколоземній орбіті

чають вагу (мал. 52). У таких умовах багато звичайних явищ протікають досить своєрідно. Так, вода поза посудиною набуває кулястої форми і вільно плаває в просторі. Кинутий предмет буде рухатися від стінки до стінки прямолінійно не зупиняючись.

63

1. Що таке вага?
2. Який зв'язок між вагою і силою тяжіння?
3. Де знаходиться точка прикладання ваги?
4. Як розрахувати вагу нерухомого тіла?
5. Коли виникає невагомість?
6. Які відмінності між вагою і силою тяжіння?



Вправа 10

1. Маса відра з будівельним розчином дорівнює 20 кг. Яка його вага?

2. Маса космонавта дорівнює 70 кг. Яка сила тяжіння діє на космонавта на навколоземній орбіті? Яка вага космонавта в цих умовах?

3. Коли підняли колоду, яка лежала на землі, то під нею виявилася вм'ятина в ґрунті. Під дією якої сили утворилася ця вм'ятина?

4. *Експериментальне завдання.* Візьміть важок і прив'яжіть до нього нитку. Тримавши важок за нитку, швидко опустіть його униз. Чи з однаковою силою діяв важок на руку під час падіння і перебуваючи в стані спокою?

§ 19. Сила тертя

Як спостерігати тертя

Взаємодія тіл, внаслідок якої змінюються швидкості цих тіл, відбувається не тільки при їх зіткненні. У природі можна спостерігати безліч випадків, коли одне тіло ковзає або котиться по поверхні іншого. Про взаємодію цих тіл можна зробити висновок із того, що швидкість цих тіл змінюється. Скотившись з гори, камінь навіть на рівній поверхні з часом зупиняється. Хокейна шайба рухається по льоду протягом певного часу, а потім зупиняється.

Закріпимо на столі похилу дошку, покладемо на неї кульку і відпустимо. Кулька скотиться, набувши деякої швидкості, прокотиться столом і врешті-решт зупиниться. Якщо на стіл покласти скло, то кулька прокотиться на більшу відстань. Отже, причиною зміни швидкості кульки є її взаємодія зі столом чи склом.

У розглянутих прикладах швидкості каменя, шайби, кульки зменшувалися. Отже, на них діяла сила, напрям якої протилежний напрямку руху. Ця сила виникала внаслідок взаємодії

тіл, які дотикаються одне до одного і здійснюють взаємне переміщення. Рухомий камінь взаємодіє з поверхнею Землі, шайба – з поверхнею льоду, кулька – з поверхнею стола чи скла. При русі тіла в рідині чи газі теж виникає сила тертя.

64



Силу, яка виникає при відносному переміщенні тіл, що дотикаються, називають силою тертя.

Як виміряти силу тертя

Досліди показують, що сила тертя може мати різні значення. Виміряти її можна за допомогою динамометра. Покладемо дерев'яний брусок на дошку, приєднаємо до нього гачок динамометра і почнемо тягнути за нього. Стрілка динамометра почне відхилятися від нульової поділки, а потім, коли брусок буде рухатися рівномірно, зупиниться на певній поділці. Це і буде значення сили тертя при русі бруска поверхнею дошки. Сила тертя завжди пропорційна силі, з якою притискається одне тіло до іншого. Цю залежність можна подати у вигляді формули:

$$F_{\text{тер}} = \mu N,$$

де $F_{\text{тер}}$ – сила тертя; N – сила реакції опори; μ – коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя μ залежить від якості поверхні дотичних тіл і від речовин, з яких вони виготовлені.

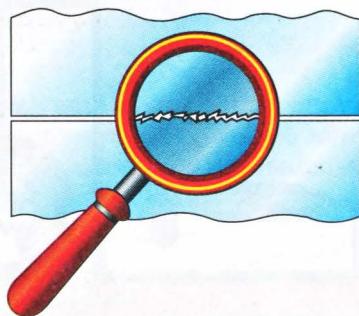
Таблиця 2

Коефіцієнт тертя ковзання

Речовини	Значення коефіцієнта
Деревина по деревині	0,7
Цегла по цеглі	0,65
Сталь по сталі	0,2
Сталь по льоду	0,02

Чому виникає сила тертя

Природу сили тертя можна пояснити, якщо врахувати властивості тіл, які взаємодіють. Поверхня кожного тіла завжди має мікроскопічні нерівності. При відносному зміщенні двох тіл ці нерівності перешкоджають взаємному зміщенню тіл, що і виявляється як сила тертя (мал. 53). Навіть старанне полірування не допоможе позбутися тертя. Дослідження показали, що сила тертя навіть буде зростати. Оскільки в цьому разі відстані між молекулами зменшуються, то можна зробити висновки, що тертя пов'язане із взаємодією молекул.



Мал. 53. Тертя виникає через наявність нерівностей на поверхнях

65

Види тертя

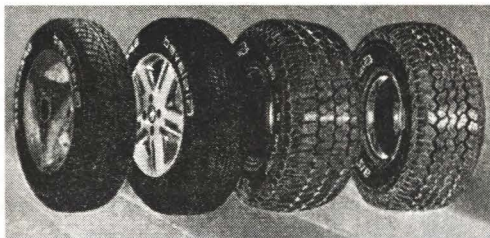
Розрізняють три види тертя: тертя ковзання, тертя кочення і тертя спокою.

Тертя ковзання виникає тоді, коли одне тіло ковзає по поверхні іншого. Тертя кочення виникає, коли одне тіло кулястої чи циліндричної форми котиться по поверхні іншого тіла. Сила тертя ковзання завжди більша за силу тертя кочення. Це добре знають вантажники, які замість того, щоб тягти бочку, котять її.

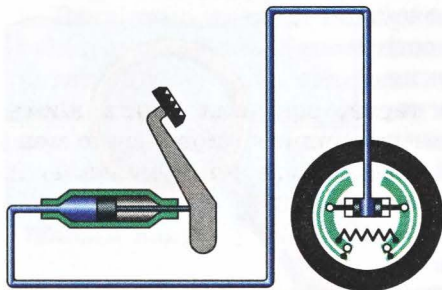
§ 20. Як враховують сили тертя

Тертя дуже поширене в природі і може або сприяти діяльності людини, або заважати. У кожному випадку люди навчилися керувати цим явищем, створюючи умови, коли сили

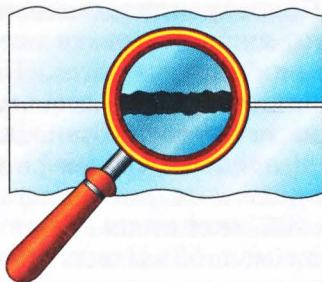




Мал. 54. Для збільшення сили тертя на поверхню шин наносять візерунок – протектор



Мал. 55. Гальмівні колодки



Мал. 56. Тертя зменшується, якщо між тертьовими поверхнями знаходиться шар мастила

тертя зменшуються або, навпаки, збільшуються. Так, для збільшення безпеки руху автомобіля його шини роблять із шорсткою поверхнею, яка до всього ще й має візерункові заглибини (мал. 54).

В усіх транспортних засобах є гальма, призначені для гальмування, тобто для прискорення зупинки автомобіля чи поїзда. Гальма оснащені гальмівними колодками, які мають покриття зі спеціального матеріалу, коефіцієнт тертя якого по сталі має велике значення (мал. 55).

Водночас є випадки, коли силу тертя потрібно суттєво зменшувати. У цьому разі тертьові поверхні розділяють рідиною – мінеральним мастилом чи навіть водою, як це відбувається в пральних машинах. Шар рідини розділяє тертьові поверхні, які вже не взаємодіють між собою (мал. 56).

На різних деталях сучасних машин і механізмів установлюють кулькові або роликові підшипники кочення (мал. 57). Як правило, це дві сталеві обойми, між якими містяться кульки чи металеві циліндрики – ролики. Такі під-



Мал. 57. Кульковий і роликовий підшипники

шипники суттєво зменшують тертя, оскільки в них діють лише сили тертя кочення, які за всіх рівних умов значно менші за сили тертя ковзання. Заповнені мастилом кулькові й роликові підшипники забезпечують швидке, безшумне й економне обертання деталей.

67

1. Чому виникає тертя між двома рухомими тілами?
2. Яка природа сил тертя?
3. Порівняйте сили тертя ковзання і кочення.
4. Як збільшити силу тертя?
5. Як зменшити силу тертя?
6. Для чого застосовують роликові чи кулькові підшипники?

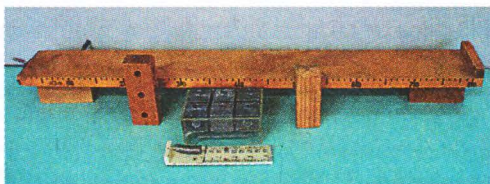


ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Вимірювання коефіцієнта тертя

Мета. Оволодіти одним з методів вимірювання коефіцієнта тертя ковзання.

Обладнання: гладенька дерев'яна дошка, дерев'яний брусок із гачком, важки масою 100 г, металевий брусок з гачком, лабораторний динамометр.



Вказівки до роботи

Якби не було тертя, то до рухомого тіла не потрібно було б прикладати силу, щоб забезпечувати його рух. Якщо існує тертя, то для рівномірного руху тіла треба прикладати додаткову силу, яка компенсує силу тертя. Значення цієї сили дорівнює значенню сили тертя. Якщо тіло переміщувати за допомогою динамометра, то його покази дорівнюватимуть значенню сили тертя.

Виконання роботи

1. До гачка динамометра прикріпіть дерев'яний брусок і визначте його вагу.

2. Покладіть брусок на поверхню дошки, прикріпіть до нього динамометр і почніть його рухати рівномірно, визначаючи значення сили, яку показує стрілка динамометра.

3. Повторіть дослід для випадку, коли на бруску буде 1, 2, 3 важки, маса кожного з яких дорівнює 100 г.

4. Результати вимірювань запишіть у таблицю.

68

№ дослідів	Вага бруска P , Н	Сила реакції опори N , Н	Сила тертя F , Н	Коефіцієнт тертя μ
1				
2				
3				
4				

5. Порівняйте значення коефіцієнта тертя для різних вимірювань і зробіть висновок.

6. **Додаткове завдання.** Дослідження повторіть для бруска, поверхня якого покрита папером.

§ 21. Важіль

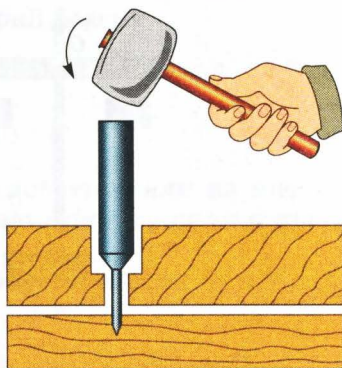
Взаємодія може відбуватися через проміжні тіла

Взаємодія між тілами може відбуватися не тільки при безпосередньому контакті, а й за наявності проміжних тіл. Таких прикладів можна навести багато. Зокрема, якщо майстер повинен забити цвях у заглибині, він ставить на головку цвяха металевий стержень і по ньому вдарає молотком (мал. 58). Молоток діє на стержень, який у свою чергу вже діє на цвях.

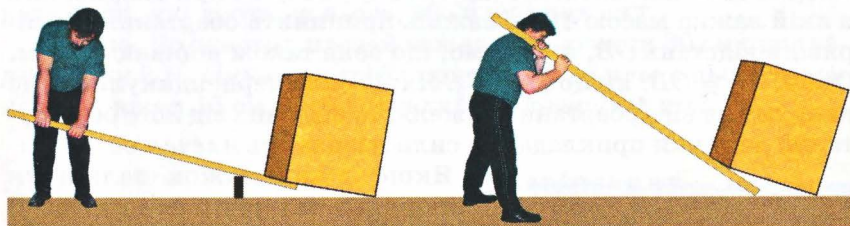
Чи можна змінювати значення сили

Якщо взаємодія між тілами відбувається через проміжні тіла, то можлива зміна сили взаємодії між ними. Вона може змінювати як напрям, так і значення. Одним з прикладів такого застосування проміжних тіл для взаємодії між тілами є важіль. У побуті і на виробництві можна спостерігати багато таких прикладів.

Часто можна бачити як важкий предмет піднімають або переміщують за допомогою дерев'яного чи металевого стержня (мал. 59). У цьому випадку стержень називають важелем.



Мал. 58. Використання сталюго стержня для забивання цвяха в заглибині



Мал. 59. Піднімання вантажу за допомогою важеля

Що таке важіль

Вісь обертання важеля може проходити через один з його кінців або всередині важеля – між точками прикладання сил.

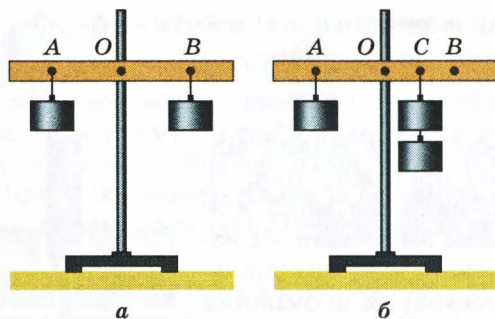
При дії кількох сил на важіль він може обертатися або взагалі бути нерухомим. В останньому випадку кажуть, що важіль зрівноважений.

Важелем називають жорсткий стержень, який має вісь обертання.



Як зрівноважити важіль

З'ясуємо, за яких умов важіль, на який діють кілька сил, буде зрівноважено.



Мал. 60. Лабораторний важіль

70

Для цього візьмемо дерев'яну планку з отвором посередині і розмістимо її на осі, закріпленій у штативі (мал. 60). Це і буде важіль. Ліворуч від осі обертання підвісимо в точці A на відстані 10 см тягарець масою 102 г. У цьому випадку кажуть, що точка A є точкою прикладання сили 1 Н. Під дією цієї сили важіль почне обертатися проти годинникової стрілки. Щоб він не обертався і залишався горизонтальним, на другому кінці важеля дослідним шляхом знайдемо таку точку B , при закріпленні в якій важка масою 102 г важіль припинить обертання. Вимірявши відстань OB , побачимо, що вона також дорівнює 10 см. Отже, $OA = OB$, якщо $F_1 = F_2$. Якщо сила перпендикулярна до напрямку на вісь обертання важеля, то відстань від його осі обертання до точки прикладання сили називають *плечем сили*.

Якщо до важеля прикладені рівні сили і він зрівноважений, то плечі сил будуть також рівними.

Якщо лівий важок залишити прикріпленим у точці A , а в точці B закріпити два таких самих важки масою по 102 г кожний, то рівновага важеля порушиться і він почне обертатися. Досягти рівноваги в цьому випадку можна, змінюючи

положення точки під'їсу двох важків. Так можна знайти нове положення точки під'їсу C . Вимірявши обидва плеча, виявимо, що праве плече OC вдвічі менше за ліве плече OA .

$$OC = \frac{OA}{2}.$$

У випадку рівноваги важеля плече більшої сили менше, і навпаки, плече меншої сили більше.

У зрівноваженому важелі плечі сил обернено пропорційні силам.

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{F_1}{F_2}.$$

Скориставшись властивістю пропорції, маємо

$$F_1 l_1 = F_2 l_2.$$

Що таке момент сили

Фізичну величину, яка дорівнює добутку сили на плече, називають *моментом сили*. Одиницею моменту сили є ньютон-метр (Н·м).

Тепер можна сформулювати умову рівноваги важеля у більш загальній формі:

Важіль перебуває в рівновазі, якщо момент сили, що обертає важіль за годинниковою стрілкою, дорівнює моменту сили, яка обертає важіль проти годинникової стрілки.



Конструктивно важіль може бути побудований і так, що сили будуть прикладені по один бік від осі обертання. Умова рівноваги для нього буде така сама, як і для важеля, розглянутого вище.

Скориставшись умовою рівноваги важеля, можна розрахувати сили, які діють на нього, або плечі цих сил.

Задача. До одного з плечей важеля завдовжки 30 см прикладено силу 2 Н. Яку силу треба прикласти до плеча цього важеля завдовжки 15 см, щоб він залишався нерухомим?

Дано:

$$F_1 = 2 \text{ Н},$$

$$l_1 = 30 \text{ см},$$

$$l_2 = 15 \text{ см}.$$

$$F_2 = ?$$

Розв'язання

За умови рівноваги важеля $F_1 l_1 = F_2 l_2$.
Звідси

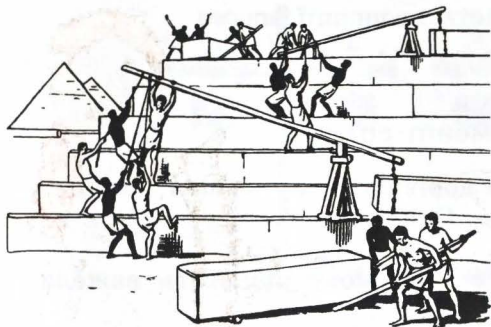
$$F_2 = \frac{F_1 l_1}{l_2}, \quad F_2 = \frac{2 \text{ Н} \cdot 30 \text{ см}}{15 \text{ см}} = 4 \text{ Н}.$$

Відповідь. До другого плеча треба прикласти силу 4 Н.



§ 22. Де застосовуються важелі

Важіль відомий людям з того часу, як людина взяла в руки палицю, щоб збити плід з гілки дерева. І вся подальша історія людства пов'язана з використанням важелів. Так, дослідженнями істориків встановлено, що під час будівництва пірамід стародавні єгиптяни використовували важелі для

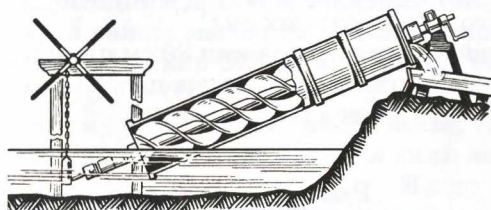


Мал. 61. Важіль використовували ще давні єгиптяни

Мал. 62. Важіль використовувався в старовинних військових машинах

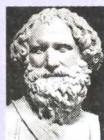


72

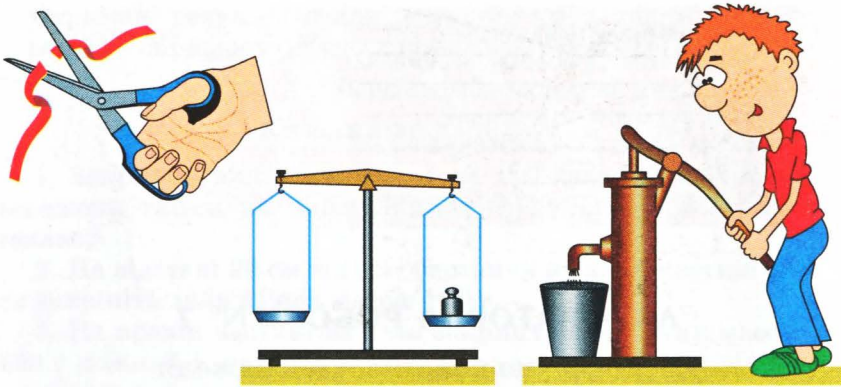


Мал. 63. Гвинт Архімеда

піднімання важких брил на значну висоту (мал. 61). Історикам науки відомо, що стародавні римляни застосовували важелі для створення різних будівельних і військових машин (мал. 62). Значний внесок у теорію важелів зробив давньогрецький учений і винахідник Архімед. Сконструйовані ним машини допомагали обороняти грецькі міста від нападників, подавати воду для зрошення полів (мал. 63), переміщувати великі вантажі на будівництві, виконувати безліч інших подібних робіт.



Архімед (близько 287–212 рр. до н. е.) – відомий давньогрецький учений. Наукові праці стосуються математики, механіки, фізики та астрономії. Автор багатьох винаходів і відкриттів, зокрема машини для зрошення полів, гвинта, важелів, блоків, військових кидальних машин і т. ін. У його праці «Про плаваючі тіла» викладені основи гідростатики.



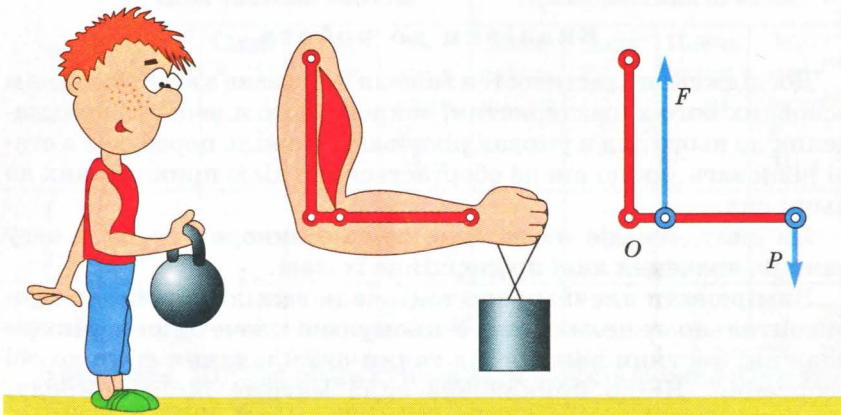
Мал. 64. Сучасні механізми містять важелі

Важелі широко застосовуються і в сучасній техніці, в найрізноманітніших сучасних машинах.

Важелем є стріла баштового крана, який застосовується під час будівництва. Вона дає змогу отримати вигоду у силі або відстані. Момент сили, прикладеної до кінця стріли при підніманні вантажу, зрівноважується моментом ваги проти-ваги, яка знаходиться на протилежному кінці стріли.

Принцип важеля використовується в багатьох пристроях та інструментах, з якими ми стикаємося повсякденно. На малюнку 64 показано деякі з них. На них легко знайти частини, які виконують роль важелів.

Важіль можна знайти і в живих організмах. За принципом важеля працює рука людини (мал. 65), ноги, голова.



Мал. 65. Важелі можна знайти і в живих організмах



1. Що називають важелем?
2. Що таке вісь обертання важеля?
3. Що таке точка прикладання сили?
4. Як виміряти плече сили?
5. Яка умова рівноваги важеля?
6. Які є типи важелів?
7. Для чого застосовують важелі?

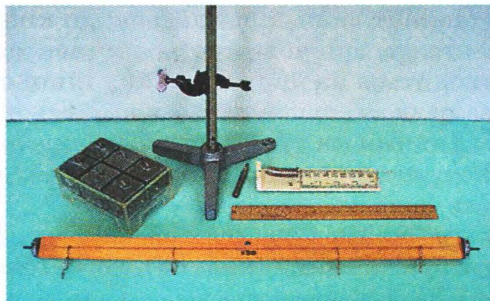
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Дослідження властивостей важеля

Мета. Дослідити властивості важеля, з'ясувати умови його рівноваги.

Обладнання: шкільний лабораторний важіль, штатив, набір важків масою 100 г кожний, лабораторний динамометр, лінійка.

74



Вказівки до роботи

Дослідження властивостей важеля пов'язане з вимірюванням основних його характеристик, зокрема його плечей та прикладених до нього сил в умовах рівноваги. Важіль перебуває в стані рівноваги, якщо він не обертається під дією прикладених до нього сил.

Як силу, що діє на важіль, зручно використовувати вагу важків, значення якої пропорційне їх масі.

Вимірювати плечі зручно тоді, коли важіль перебуває в горизонтальному положенні. У цьому разі плече сили дорівнює довжині частини важеля від точки прикладання сили до осі обертання. Якщо прикладена сила матиме іншу природу, ніж вага, то для зручності виконання роботи треба допомогтися, щоб вона була перпендикулярною до важеля.

Отримані результати для описаних умов мають загальний характер і справджуються для інших випадків зрівноваженого важеля.

Виконання роботи

1. Закріпіть в штативі вісь і на неї насадіть важіль. Повертаючи гайки на його кінцях, встановіть його горизонтально.

2. На відстані 20 см від осі обертання на лівій частині важеля закріпіть один важок масою 100 г.

3. На правій частині важеля закріпіть два важки масою по 100 г кожний і, пересуваючи підвіс уздовж важеля, відновіть горизонтальне положення важеля. Виміряйте плечі сил.

4. Перемістіть лівий важок ближче до осі обертання, знайдіть таке положення важків на правій частині важеля, при якому він займе горизонтальне положення. Виміряйте плечі сил.

5. До лівого плеча важеля на відстані 10 см від осі обертання підвісьте три важки масою по 100 г кожний.

6. До гачка на правому плечі важеля приєднайте динамометр і знайдіть таке положення гачка, при якому стрілка динамометра не виходить за межі шкали, а важіль буде зрівноваженим у горизонтальному положенні. Виміряйте плече і значення сили, прикладеної до правого плеча.

7. Результати вимірювань запишіть в таблицю, виконайте розрахунки і знайдіть значення сил і моментів сил. Порівняйте значення моментів сил для кожного з дослідів і зробіть висновки.

75

Таблиця

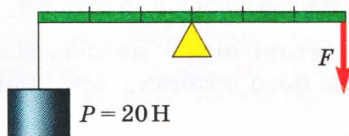
№ досліду	Ліва частина важеля				Права частина важеля			
	Маса важка m_1 , кг	Сила F_1 , Н	Плече сили l_1 , м	Момент сили $F_1 l_1$, Н·м	Маса важка m_2 , кг	Сила F_2 , Н	Плече сили l_2 , м	Момент сили $F_2 l_2$, Н·м
1								
2								
3								

Примітка. Під час розрахунків ваги важків можна вважати

$$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}.$$

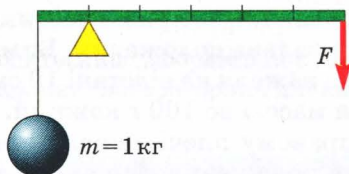
Вправа 11

1. Яку силу потрібно прикласти до важеля, щоб утримати в рівновазі вантаж (мал. 66)?



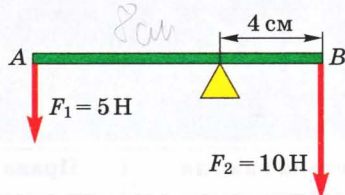
Мал. 66

2. Розрахувати силу F , за допомогою якої можна зрівноважити силу тяжіння, що діє на кулю, підвішену до одного з плечей важеля (мал. 67).



Мал. 67

3. Яка довжина важеля AB , якщо він перебуває у стані рівноваги (мал. 68)?

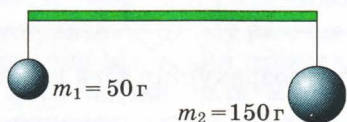


Мал. 68

4. Чому двері легше відчинити, штовхаючи їх біля дверної ручки, а не біля завіс, на яких вони підвішені?

5. Чому не можна копати лопатою, тримаючи її однією рукою? Яка роль другої руки? Де найкраще нею тримати лопату?

6. Де треба розмістити опору, щоб важіль перебував у рівновазі (мал. 69)?



Мал. 69

§ 23. Блоки

Чи завжди зручно застосовувати важіль

Підняти вантаж на значну висоту за допомогою важеля дуже складно. Чим більша висота, на яку треба підняти вантаж, тим довшим має бути важіль. Такого недоліку позбавлений блок.

Що таке блок

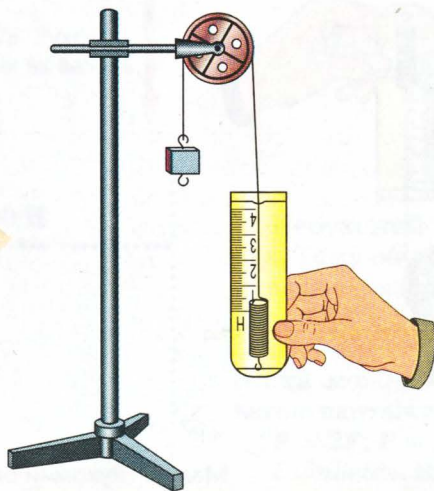
Блок – це пристрій, який складається з мотузки, перекинutoї через колесо, яке може обертатися на осі.

Обід колеса, як правило, має жолоб, в якому прокладається мотузка, трос або ланцюг.

Вісь блока може бути нерухомою або переміщуватися разом із колесом. У зв'язку з цим розрізняють блоки *рухомі* і *нерухомі*.

Який блок називають нерухомим

У нерухомого блока вісь обертання не змінює свого положення в просторі. Вона за допомогою спеціальної обойми закріплюється на балці, стелі або на іншій опорі (мал. 70). Якщо до кінця мотузки, перекинutoї через блок, прикласти силу, то другий кінець мотузки почне переміщуватися вгору. Якщо до цього кінця прикріпити вантаж певної маси, то він також буде підніматися вгору. Якщо на вільний кінець мотузки діє сила, напрямлена вниз, то на вантаж діє сила, напрямлена вгору. Вимірювання цих сил показує, що вони однакові.

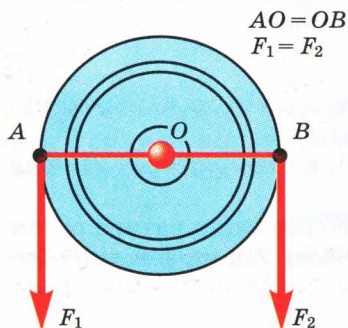


Мал. 70. Нерухомий блок

Чому нерухомий блок не дає виграшу в силі



Нерухомий блок виграшу в силі не дає, він лише змінює напрям дії сили.



Мал. 71. Нерухомий блок як важіль

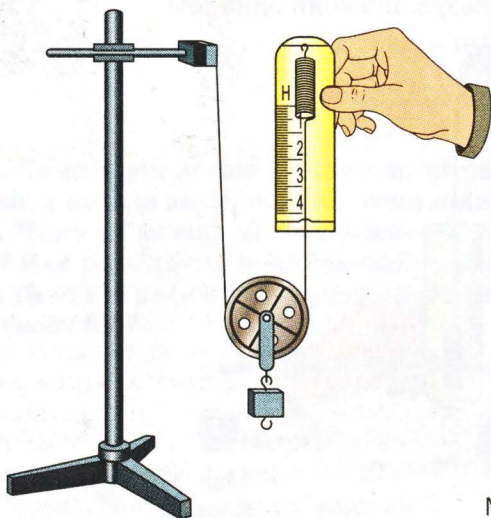
Таку особливість можна легко пояснити, врахувавши, що нерухомий блок схожий на рівноплечий важіль. Для цього перенесемо точки прикладання сил вгору до точок A і B , де мотузка дотикається до блока (мал. 71). Плечі цих сил OA і OB будуть однаковими, як і радіуси кола. З умови рівноваги важеля сили F_1 і F_2 також повинні бути однаковими. Дослід підтверджує такі висновки.

Який блок називають рухомим

Рухомим називають блок, вісь якого переміщується в просторі. При застосуванні такого блока зазвичай один кінець мотузки чи троса закріплюють на опорі, а вантаж — на обоймі, в якій закріплений блок. На малюнку 72 показано дослід з таким блоком. До осі легкого рухомого блока підвішений важок



Ідеальний рухомий блок дає вигравш у силі в два рази.



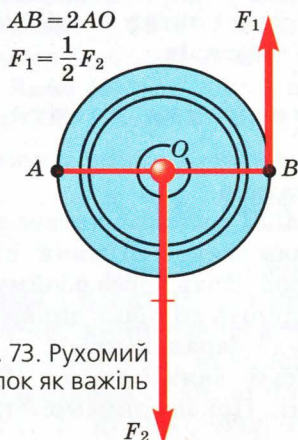
Мал. 72. Рухомий блок

масою 102 г. Отже, до осі блока прикладена сила 1 Н. Стрілка ж динамометра, приєднаного до вільного кінця мотузки показує приблизно 0,5 Н. Деякі невеликі розбіжності пов'язані з тим, що сам блок має вагу і на нього діє сила тертя.

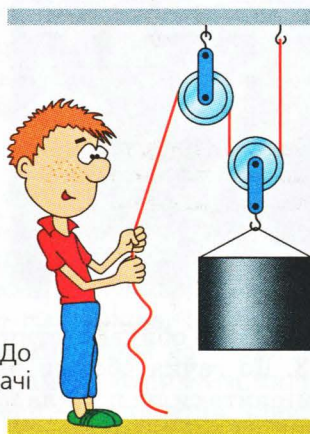
Чому рухомий блок дає вигреш у силі

Такі особливості рухомого блока можна пояснити на основі властивостей важеля (мал. 73). Диск блока можна вважати важелем завдовжки $2R$ (де R – радіус колеса). Вісь обертання такого важеля проходить через точку A на ободі колеса, а точками прикладання сил є точки O і B . Оскільки $AB = 2OA$, то $F_1 = \frac{F_2}{2}$. Описані вище властивості блоків використовують під час розв'язування практичних задач.

Задача. Визначити вагу вантажу, який утримується системою рухомого і нерухомого блоків, якщо до вільного кінця троса прикладено силу 300 Н (мал. 74).



Мал. 73. Рухомий блок як важіль



Мал. 74. До задачі

Дано:
 $F = 300 \text{ Н}$

$P = ?$

Розв'язання

Нерухомий блок вигрешу в силі не дає. Тому обчислення виконуємо з урахуванням лише рухомого блока, який дає вигреш у два рази. Про масу блока в задачі нічого не сказано, тому вагою блока можна знехтувати порівняно з вагою вантажу. Отже,

$$P = 2F; P = 2 \cdot 300 \text{ Н} = 600 \text{ Н}.$$

Відповідь. Вага вантажу 600 Н.



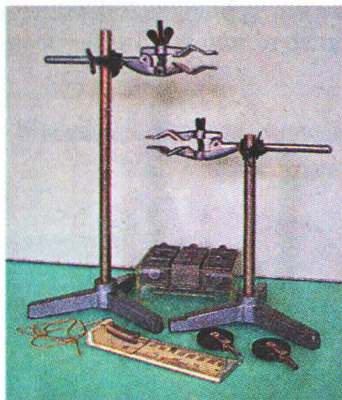
1. Яка будова нерухомого блока?
2. Яка будова рухомого блока?
3. Який із блоків дає вигравш у силі? Чому?
4. Який блок дає змогу змінити напрям дії сили?
5. Де застосовуються блоки?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Вивчення блоків

Мета. Дослідити властивості рухомого й нерухомого блоків.

Обладнання: рухомий і нерухомий блоки з лабораторного набору, два штативи, нитка, набір важків масою 100 г, лабораторний динамометр.



Вказівки до роботи

Під час виконання роботи штативи використовувати як нерухомі опори. Блоки і нитки закріплювати в лапках штативів.

Виконання роботи

1. Один кінець нитки закріпіть у лапці штатива.
2. У лапці другого штатива закріпіть динамометр. Вільний кінець нитки пропустіть через обійму блока і прикріпіть до гачка динамометра так, щоб обидві частини нитки були паралельними.
3. До гачка обійми блока підвісьте важок масою 100 г і виміряйте силу, прикладену до нитки. Покази динамометра запишіть в таблицю.
4. До гачка обійми блока підвісьте два важки масою по 100 г кожний і виміряйте силу натягу нитки.
5. Повторіть п. 4 для трьох важків.
6. Результати вимірювань запишіть у таблицю і зробіть висновки.
7. Закріпіть обійму блока в лапці штатива, пропустіть через нього нитку і за її допомогою підніміть три важки, вимірявши динамометром силу, прикладену до вільного кінця нитки. Зробіть висновки.
- 8*. Спроектуйте і складіть установку, в якій нерухомий блок дає змогу виміряти силу, що діє на рухомий блок з горизон-

тально розміщеним динамометром. Зробіть висновки щодо дії нерухомого блока.

Таблиця

№ досліду	Маса важків m , кг	Вага важків P , Н	Сила натягу нитки F , Н	Відношення P/F
1				
2				
3				

Вправа 12

1. Чому розмотувати нитку з повної котушки легше, ніж із частково розмотаної?

2. Визначити силу, з якою тисне на поверхню підлоги людина вагою 0,69 кН, що підіймає за допомогою нерухомого й рухомого блоків вантаж масою 130 кг.

3. Який вантаж можна підняти за допомогою рухомого блока вагою 40 Н, якщо мотузку тягти із силою 0,2 кН?



§ 24. Похила площина

Перелік простих механізмів не обмежується важелями і блоками. До простих механізмів належить також пристрій, який називають *похилою площиною*. Це будь-яка плоска поверхня, нахилена під деяким кутом до горизонту. Використання похилої площини дає змогу отримати вигреш у силі. У цьому легко переконатися, виконавши простий дослід.

До гачка динамометра підвісимо брусок масою 200 г і почнемо рівномірно підіймати вертикально вгору. Динамометр покаже силу приблизно 2 Н.

Закріпимо в штативі гладеньку дошку так, щоб вона була нахилена під певним кутом до горизонту. Покладемо на неї брусок і почнемо рівномірно рухати його поверхнею цієї дошки вгору. Покази динамометра будуть помітно меншими, ніж у першому випадку. Оскільки така дошка може мати довільну довжину, то за її допомогою

Похила площина дає змогу отримати вигреш у силі, який залежить від кута її нахилу.



можна підняти вантаж на будь-яку висоту. При цьому прикладена до тіла сила буде меншою, ніж вага тіла.

Чим менша висота похилої площини порівняно з її довжиною, тим більшим буде виграш у силі. Якщо довжину похилої площини позначити через l , а висоту через h , то їх відношення буде $\frac{l}{h}$. Відповідно відношення ваги до прикладеної сили буде $\frac{P}{F}$.

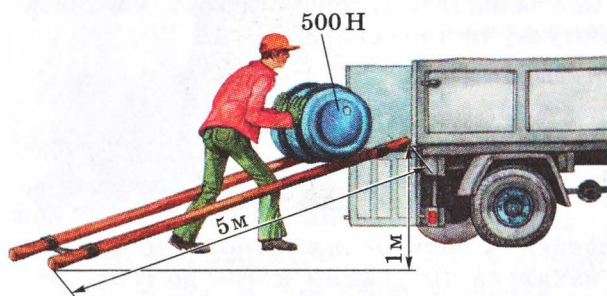
Для ідеальної похилої площини ці відношення рівні:

$$\frac{l}{h} = \frac{P}{F}.$$

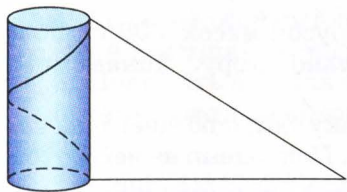
З формули видно, що для збільшення виграшу в силі потрібно робити довшою похилу площину при тій самій висоті піднімання.

Властивості похилої площини використовуються в багатьох сферах виробничої діяльності людини. Так, при вивезенні руди з глибоких кар'єрів дорогу, якою рухаються автомобілі-рудовози, прокладають по схилу котловини, поступово піднімаючи її вгору.

Похилу площину застосовують і для навантажувальних робіт на транспорті (мал. 75).



Мал. 75. Похила площина полегшує роботу вантажників



Мал. 76. Гвинтова лінія як похила площина

Окремим видом похилої площини є гвинт. Різьба, нанесена на бічну поверхню циліндра, утворює певний кут з його поздовжньою віссю (мал. 76), і це дає можливість отримувати виграш у силі.

За один оберт гвинта гайка переміщується на відстань, що дорівнює відстані між двома сусідніми витками. Але кожна точка гайки переміщується на довжину одного витка, яка значно більша за крок гвинта. Якщо крок гвинта позначити літерою d , а довжину

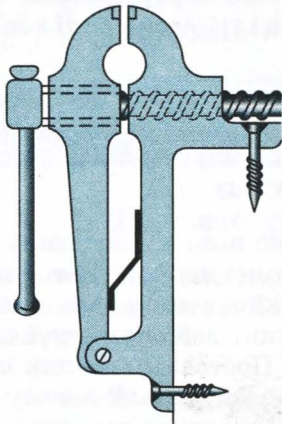
одного витка – $2\pi R$, де R – радіус витка, то отримаємо відношення

$$\frac{P}{F} = \frac{2\pi R}{d}.$$

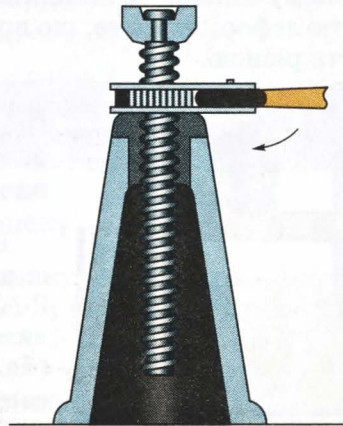
Гвинти, як правило, дають значний вигреш у силі, тому їх застосовують у різних технічних пристроях для надійного з'єднання деталей.

Як приклад застосування гвинта можуть бути слюсарні лещата. Для прокручування гвинта лещат прикладається невелика сила, а губки лещат діятимуть на тіло зі значною силою (мал. 77).

Подібним чином діє і гвинтовий домкрат (мал. 78).



Мал. 77. Гвинт у слюсарних лещатах



Мал. 78. Гвинтовий домкрат

1. Який механізм називають похилою площиною?
2. З якою метою застосовують похилу площину?
3. Як розрахувати силу, яку необхідно прикласти до тіла для переміщення його похилою площиною?
4. Що спільного у похилій площині і гвинта?



Вправа 13

1. Яку силу треба прикласти до колоди масою 210 кг, щоб підняти її на висоту 3 м за допомогою ідеальної похилої площини завдовжки 9 м?

2. Яка вага бочки, якщо при підніманні її на висоту 2 м похилою площиною завдовжки 4 м прикладена сила 800 Н?

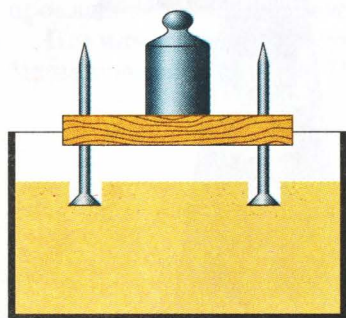
3. Яка висота похилої площини, якщо її довжина дорівнює 5 м, а для піднімання по ній тіла вагою 1,5 кН прикладена сила 300 Н? Тертя не враховувати.

4. Чому дорогу, яка веде на високий перевал, роблять у вигляді серпантину – відрізків, з'єднаних між собою і нахилених під невеликим кутом до горизонту?

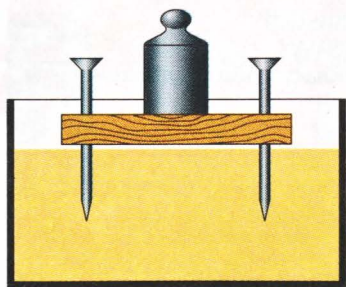
§ 25. Механічний тиск

Основною ознакою сили є зміна швидкості тіла або його частин. Якщо внаслідок дії сили окремі його частини по-різному змінюють швидкість, то тіло деформується. Особливістю деформації є те, що при одній і тій самій силі вона може бути різною.

84



Мал. 79. Тиск на пісок створюється головками цвяхів



Мал. 80. Тиск на пісок створюється вістрями цвяхів

Від чого залежить деформація взаємодіючих тіл

Візьмемо широку посудину і наsipлемо в неї зволоженого піску. З дерев'яної дощечки виготовимо столик, забивши в неї цвяхи (мал. 79). Поставимо столик на пісок головками цвяхів донизу. Під цвяхами з'являться невеликі вм'ятини.

Перевернемо столик і поставимо його на пісок вістрями цвяхів. При тому самому навантаженні столик зануриться глибоко в пісок (мал. 80).

Чому результати дослідів різні

Результати дослідів можна легко пояснити, врахувавши, що між піщинками існують певні сили взаємодії. У першому досліді ніжки столика мали значну площу опори і діяли на велику кількість піщинок,

утримуваних міжмолекулярними силами. Внаслідок цього на кожну піщинку діяла незначна сила, якої було недостатньо для руйнування зв'язків. У другому досліді сила прикладена до невеликої кількості піщинок, розміщених під гострими вістрями цвяхів. Зрозуміло, що в цьому випадку на кожну піщинку діє значно більша сила. Сил взаємодії між піщинками стало недостатньо, щоб зрівноважити діючу силу, і зв'язки між піщинками порушилися. Цвяхи легко занурилися в пісок.

У всіх подібних випадках дуже складно визначити, на скільки молекул діє сила. Але зрозуміло, що чим більша площа поверхні взаємодії між тілами, тим більша кількість молекул під нею міститься. Тому домовилися розраховувати силу, яка діє на одиницю площі поверхні тіла. Це дає можливість провести певні розрахунки і з'ясувати можливі наслідки дії сили.

Що таке тиск

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні, називають механічним тиском.



85

Що таке сила тиску

Силу взаємодії, що діє перпендикулярно до поверхні тіл, називають *силою тиску*. Саме цю силу і використовують для розрахунку тиску.

Як розрахувати тиск

При збільшенні сили тиску, тиск зростатиме, тобто він пропорційний до сили тиску. Якщо при однаковій силі тиску збільшувати площу взаємодії, то тиск буде зменшуватися. Отже, тиск обернено пропорційний до площі взаємодії. Взавши коефіцієнт пропорційності 1, формула для розрахунку тиску буде мати вигляд:

$$p = \frac{F_T}{S},$$

де p – тиск; F_T – сила тиску; S – площа поверхні, на яку діє сила.

За одиницю тиску взято тиск, що його чинить сила 1 Н на поверхню площею 1 м². Цю одиницю назвали *паскалем* (Па) на честь французького вченого Блеза Паскаля:

$$\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}.$$



Блез Паскаль (1623–1662) – французький математик, фізик і філософ. Фізичні дослідження стосуються в основному гідростатики. Йому належить відкриття закону передачі тиску рідиною, він розробив принцип дії гідравлічної машини, застосував ртутний барометр для передбачення погоди, створив лічильну машину.

Тиск в 1 Па дуже малий. Такий тиск чинить тіло масою 102 г, діючи на поверхню площею 1 м². Тому на практиці зазвичай використовують кратні одиниці:

1 гектопаскаль = 100 Па = 1 гПа;

1 кілопаскаль = 1000 Па = 1 кПа;

1 мегапаскаль = 1 000 000 Па = 1 МПа.

У природі взаємодіють різні тіла. Тому і значення тиску можуть бути найрізноманітнішими. Окремі приклади різних значень тиску наведено в таблиці 3.

86

Таблиця 3

Різні значення тиску в природі

Тиск різних тіл	Значення тиску, Па
Повітря на висоті 800 км	10^{-8}
Танк на поверхню дороги	10^5
Автомобіль на поверхню дороги	$0,3 \cdot 10^5$
Жало бджоли	$0,5 \cdot 10^8$
Вибух водневої бомби	10^{14}

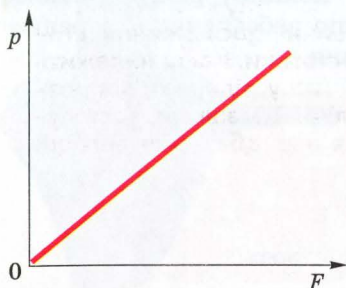
Знаючи тиск, легко розрахувати силу тиску або площу поверхні, на яку вона діє:

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

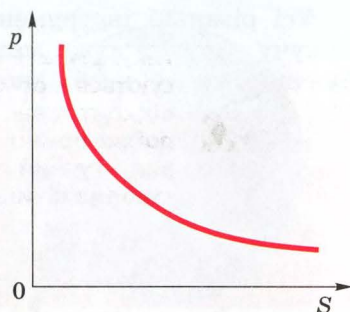
Як можна змінити тиск

Тиск, якщо є потреба, можна довільно змінювати, змінюючи його силу. Збільшення або зменшення сили тиску спричиняє відповідно збільшення або зменшення тиску. З графіка (мал. 81) видно, що тиск пропорційний силі тиску.

Проте змінювати тиск шляхом зміни сили тиску не завжди зручно і можливо. Тому змінюють площу, на яку діє сила тиску. Якщо площу поверхні збільшувати, то тиск від-



Мал. 81. Тиск пропорційний силі тиску



Мал. 82. Тиск обернено пропорційний площі

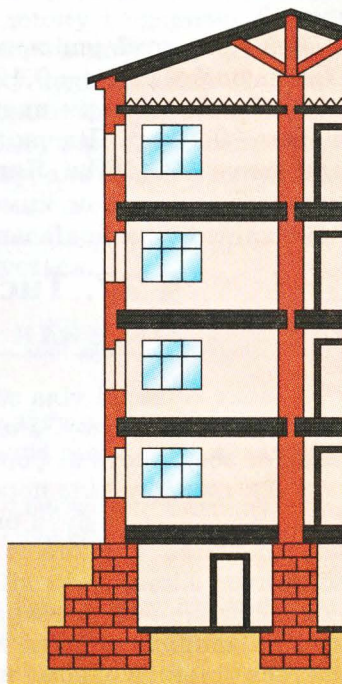
повідно зменшуватиметься, і навпаки, зі зменшенням площі тиск зростатиме. На графіку (мал. 82) ця залежність показана кривою, характерною для обернено пропорційної залежності.

§ 26. Як враховують тиск



Особливості тиску враховують у техніці, на виробництві, в побуті. Проектуючи будинок, архітектор передовсім дбає про те, щоб споруда не занурювалася в ґрунт. Зменшувати масу будинку можна лише в певних межах, за якими він втрачає належну міцність. Тому в таких випадках будують фундамент, який має велику площу опори (мал. 83).

Щоб не грузнути в пухкому снігу, користуються лижами, які суттєво збільшують площу опори і зменшують тиск. Площа кінця вістря швацької голки становить всього лише $0,001 \text{ мм}^2$. Тому для проколювання щільної тканини достатньо навіть незначної сили.



Мал. 83. Фундамент будинку має велику площу опори

Усі різальні інструменти – ножі, ножиці, різці – мають ріжучу частину дуже малої площі, що забезпечує створення значного тиску, необхідного для різання.



1. Що таке тиск?
2. Які одиниці тиску?
3. Як розрахувати тиск?
4. Яку силу називають силою тиску?
5. Як можна змінювати тиск?
6. Як ураховують тиск у технічних пристроях?

Вправа 14

1. Для чого, шиючи голкою, людина надіває на палець наперсток – металевий ковпачок специфічної форми?

2. По тонкому льоду людина може повзти, лежачи на животі або на довгій дошці. Чому небезпечно переходити лід?

3. Мармурова колона античного храму масою 500 т має площу основи $12,5 \text{ м}^2$. Який тиск чинить колона на опору?

4. Маса трактора дорівнює 12 т, а площа опори обох гусениць – $2,4 \text{ м}^2$. Який тиск чинить трактор на ґрунт?

5. Площа ступні людини дорівнює 180 см^2 , а її маса 72 кг. Який тиск чинить ця людина, якщо вона стоїть на обох ногах?

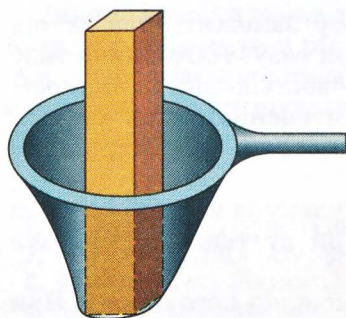
6. Коток, який ущільнює асфальт, створює тиск 400 000 Па. Площа опори котка – $0,12 \text{ м}^2$. Яка маса цього котка?

7. Площа головки цвяха дорівнює $0,3 \text{ см}^2$, а площа кінця вістря – $0,1 \text{ мм}^2$. Під час удару молотка по головці цвяха тиск становить 500 МПа. Який тиск чинить вістря цвяха в цей момент?

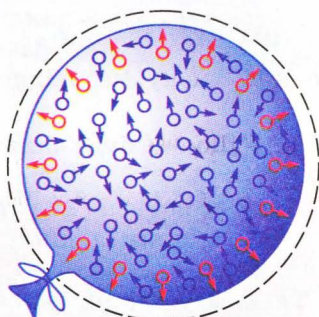
§ 27. Тиск газів і рідин. Закон Паскаля

Тверді тіла зберігають і об'єм, і форму. Рідкі тіла не зберігають форму, але зберігають об'єм. Газоподібні речовини не зберігають ні форму, ні об'єм.

Тиск твердого тіла породжений силою, яка діє на це тіло. Її походження може бути різним. Це може бути або сила тяжіння, або сила пружності. Напрямок дії такого тиску завжди збігається з напрямом дії сили тиску. Якщо на гумову плівку покласти яке-небудь тверде тіло, то плівка прогнеться лише під ним і в напрямі дії ваги тіла (мал. 84). Тиск твердих тіл передається тільки в одному напрямі: в напрямі дії сили тиску.



Мал. 84. Під дією бруска
гумова плівка прогинається
в одному напрямі



Мал. 85. Тиск газу
в кульці

Тиск можуть створювати також гази і рідини. З'єднаємо гумову кульку з насосом і почнемо накачувати в неї повітря. Кулька збільшуватиме свої розміри, набуваючи кулястої форми. Це свідчить, що на внутрішні стінки кульки діє певна сила, яка створює тиск (мал. 85). Причиною такого тиску є рух молекул. Перебуваючи в хаотичному русі, молекули взаємодіють як між собою, так і зі стінками посудини.

89

Щоб зрозуміти, як це відбувається, зробимо такий дослід. Підвісимо вертикально на мотузках дошку і вдаримо по ній м'ячем. Від удару м'яча дошка зміститься на деяку відстань. У цьому разі ми кажемо, що на дошку подіяла сила. Подібне відбувається і тоді, коли в стінку посудини вдаряється молекула. Хоча маса молекули дуже мала, і від удару однієї молекули стінка практично не змінить свого стану, але в стінку посудини вдаряється величезна кількість рухомих молекул, які разом створюють відчутну дію на стінку, внаслідок якої стінка змінює свій стан: деформується або зміщується.

Молекули рухаються хаотично, тому тиск газу діє в усіх напрямках. У цьому його відмінність від тиску твердих тіл.

Кількість молекул, які взаємодіють зі стінкою, залежить від маси газу в даному об'ємі. Чим більша маса газу в даному об'ємі, тим більша його густина і кількість молекул в одиниці об'єму (концентрація молекул).

Якщо в гумовий балончик насосом накачувати повітря, збільшуючи його масу і густину, то розміри балончика збільшуватимуться.

Тиск газу є наслідком руху молекул.



Тиск газу залежить від його густини.



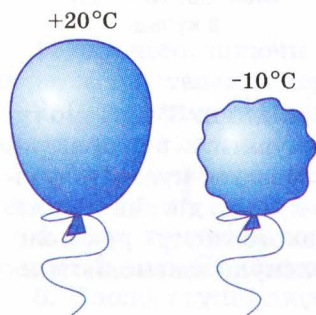


Тиск газу залежить від температури.

Тиск газу залежить також від температури газу. Нагрівання газу спричиняє збільшення швидкості молекул. Інтенсивність їх взаємодії зі стінкою буде більшою, що приводить до збільшення тиску.

Якщо наповнену повітрям гумову кульку за морозної погоди винести з приміщення, то її розміри суттєво зменшаться (мал. 86).

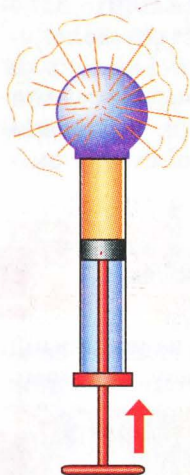
Тиск газу сталої маси залежить також від його об'єму. При збільшенні об'єму тиск газу зменшується, а при зменшенні об'єму – тиск збільшується. Змінити об'єм газу можна, діючи на нього сторонньою силою, яка створює певний тиск. Якщо не брати до уваги зміну об'єму, а враховувати лише дію сторонньої сили, за якої тиск газу збільшується, то можна казати, що газ передає тиск. Візьмемо приєднану до циліндра з поршнем кулю, яка має отвори по всій поверхні, і почнемо переміщувати поршень, стискувати в ній газ з деякою кількістю диму (мал. 87). Ми побачимо, що з усіх отворів



Мал. 86. Тиск газу залежить від температури

кулі виходять однакові цівки диму. Отже, газ передає тиск в усіх напрямках однаково.

Аналогічний дослід можна провести і з рідиною і пересвідчитися, що рідина передає тиск в усіх напрямках однаково.



Мал. 87. Газ передає тиск в усіх напрямках однаково



Тиск, який діє на рідину, передається нею в усіх напрямках однаково.

Об'єднавши два попередні висновки, отримаємо формулювання закону Паскаля, який стосується як рідин, так і газів.



Тиск, який діє на рідину або газ, передається ними в усіх напрямках однаково.

Закон Паскаля може діяти лише тому, що молекули в рідині, як і в газі, слабо взаємодіють між собою і можуть вільно зміщуватися в будь-якому напрямі.

Дія закону Паскаля не залежить від роду рідини чи газу.



1. Яка властивість спільна для рідин і газів?
2. Як залежить тиск газу від його густини?
3. Чому тиск газу залежить від температури?
4. Як гази передають тиск?
5. Як рідини передають тиск?
6. Сформулюйте закон Паскаля.



Вправа 15

1. У верхній частині камери колеса автомобіля повітря перебуває під тиском 210 кПа. Який тиск повітря у нижній частині камери?

2. Чому, коли в колбу з тонкими стінками налито рідину, її закривають так, щоб пробка не тиснула безпосередньо на рідину?

3. Який тиск у камері колеса автомобіля, якщо на поршень насоса площею 12 см^2 діє сила 240 Н?

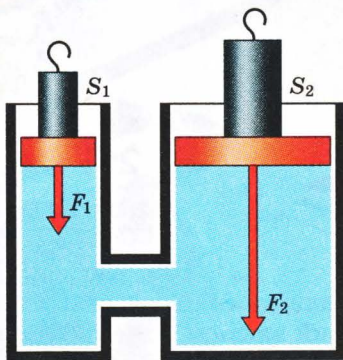
91

§ 28. Гідравлічна машина

Закон Паскаля покладений в основу принципу дії багатьох технічних пристроїв і машин. Для випадку використання закону Паскаля для рідин вони дістали назву гідравлічних машин.

Найпростіша гідравлічна машина складається з двох циліндрів, з'єднаних між собою трубкою. У кожному циліндрі знаходиться поршень, який щільно прилягає до стінок циліндрів. Під поршнями в циліндрах міститься яка-небудь рідина. Як правило, це мінеральне масло (мал. 88). Застосування рідини зумовлене її малою стисливістю.

Якщо натиснути на один із поршнів так, щоб він змістився, ство-



Мал. 88. Схема гідравлічної машини

рюючи тиск на рідину, то другий поршень також зміститься. Отже, відповідно до закону Паскаля тиск, який діє на рідину в першому циліндрі, буде передаватися рідині в другому циліндрі. Завдяки цьому тиску поршень другого циліндра зміститься.

Цінною властивістю гідравлічної машини є можливість за її допомогою змінювати значення сили. І таку зміну можна розрахувати.

Нехай площа першого поршня буде S_1 . Якщо на нього діє сила F_1 , то він створить тиск p_1 :

$$p_1 = \frac{F_1}{S_1}.$$

Згідно із законом Паскаля такий самий, як у всій рідині, тиск діятиме і на другий поршень: $p_1 = p_2$.

Оскільки

$$p_2 = \frac{F_2}{S_2},$$

то

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}.$$

Проаналізувавши останню формулу, можна зробити висновок, що змінюючи площі поперечного перерізу циліндрів, можна змінювати силу, яка діє на них з боку рідини.

Чим більша площа одного циліндра порівняно з площею другого, тим більшу зміну сили дістанемо при застосуванні такої машини.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}; F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}.$$

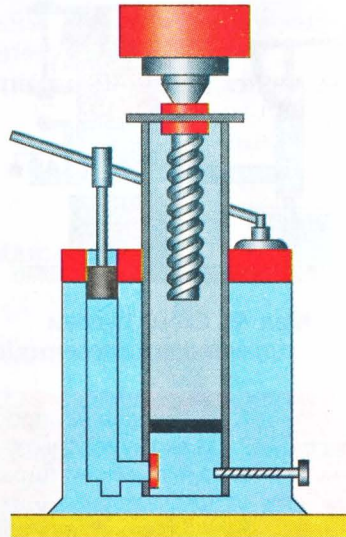
§ 29. Застосування гідравлічної машини в техніці

Однією з проблем, які розв'язує сучасна техніка, є піднімання вантажів великої маси і ваги. Це може бути великий вантаж, автомобіль, вагон залізничного поїзда і навіть цілий будинок. З цією метою застосовують спеціальні пристрої, які називають домкратами. Найбільшого поширення набули домкрати, в яких застосовується принцип гідравлічної

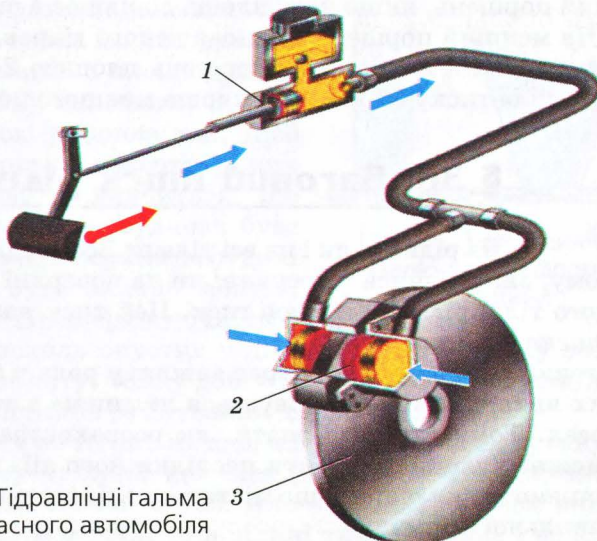


машини (мал. 89). Він складається з двох циліндрів різних діаметрів і поршнів, розміщених у них. Поршень малого діаметра одночасно є і поршнем насоса, який нагнітає масло в циліндр великого діаметра. Оскільки другий поршень має значно більший діаметр, то і сила, що діє на нього, буде значно більшою за ту, яка діє на поршень малого діаметра. Користуючись домкратом, водій може зусиллям своїх рук підняти багатотонний автомобіль.

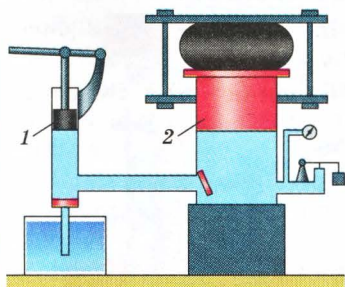
Подібний принцип застосовується в гальмівних системах сучасних автомобілів. Гальма, які отримали назву гідравлічних, мають циліндр малого діаметра 1, поршень якого жорстко зв'язаний з гальмівною педаллю, і циліндри більшого діаметра, поршні 2 яких можуть безпосередньо діяти на гальмові колодки, які з двох боків стискають диски, що знаходяться на кожному колесі 3. Уся гальмівна система заповнена мінеральним маслом. Така будова гальм дає можливість незначним натиском на педаль створювати велику силу, яка діє на гальмові колодки (мал. 90).



Мал. 89. Схема будови гідравлічного домкрата.



Мал. 90. Гідравлічні гальма сучасного автомобіля



Мал. 91. Схема будови гідравлічного преса

Гідравлічними машинами є і більшість виконавських механізмів сучасних транспортних, будівельних, навантажувальних машин. Типовим прикладом такого механізму є гідравлічний прес (мал. 91). Він має робочий циліндр з поршнем великого діаметра 2 і насос 1, яким нагнітають масло в нього. Оскільки площа робочого циліндра більша, ніж площа циліндра насоса, то отримують відповідний вигравш у силі.

1. Яка будова найпростішої гідравлічної машини?
 2. На якому законі ґрунтується принцип дії гідравлічної машини?
 3. За якої умови гідравлічна машина дає вигравш у силі?
 4. Чому в гідравлічних машинах застосовуються рідини, а не газ?
 5. Яка будова гідравлічного домкрата?
 6. Яка будова гідравлічних гальм?

Вправа 16

1. Сила тиску, що діє на менший поршень гідравлічного преса, дорівнює 400 Н, площа якого 5 см^2 . Яка сила тиску діє на більший поршень, якщо його площа становить 250 см^2 ?

2. На більший поршень гідравлічного преса площею 2 дм^2 діє сила 10 Н. Знайти силу тиску, яка діє на зрівноважений менший поршень, якщо його площа дорівнює 4 см^2 .

3. На менший поршень зрівноваженого гідравлічного преса діє сила 80 Н, а на більший поршень площею 2400 см^2 передається сила тиску 32 кН. Яка площа меншого поршня?

§ 30. Ваговий тиск рідин

На рідини, як і на всі тіла на Землі, діє сила тяжіння. Тому, знаходячись у посудині чи на поверхні якого-небудь твердого тіла, рідина створює тиск. Цей тиск називають *ваговим тиском* рідини.

Ваговий тиск рідини відіграє важливу роль у багатьох природних явищах і використовується людиною в технологічних процесах. Тому важливо знати, як розраховувати цей тиск, щоб можна було передбачити наслідки його дії. З цією метою розглянемо деяку рідину, що міститься в циліндричній посудині правильної форми.

Оскільки на рідину діє сила тяжіння, вона має певну вагу, що спричинює дію сили тиску на дно посудини.

За означенням, тиск дорівнює відношенню сили тиску до площі поверхні, на яку вона діє:

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

Силою тиску в даному разі є вага рідини:

$$F = P = gm.$$

Для циліндричної посудини маса рідини дорівнює:

$$m = \rho_p V = \rho_p Sh,$$

де h – висота рівня рідини над дном посудини; S – площа дна посудини; ρ_p – густина рідини.

Таким чином, тиск рідини на дно посудини

$$p = \frac{F}{S} = \frac{gm}{S} = \frac{g\rho_p V}{S} = \frac{g\rho_p Sh}{S} = g\rho_p h.$$

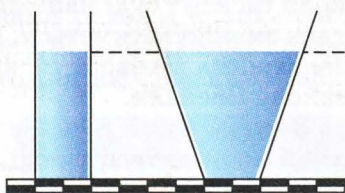
95

Отже, тиск рідини на дно посудини залежить лише від висоти стовпа рідини та її густини. Такий висновок дістав у фізиці назву парадокса Паскаля.

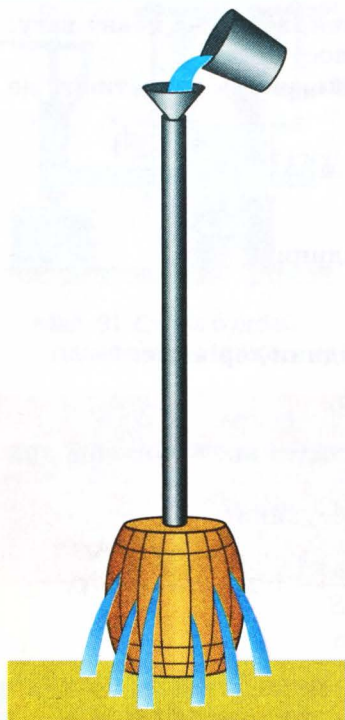
Згідно з гідростатичним парадоксом тиск рідини не залежить від її маси. Якщо взяти дві посудини, в яких об'єм різний, а площа дна однакова (мал. 92), заповнити їх певною однорідною рідиною так, щоб відстань від дна до поверхні в них була однакова, то виявиться, що тиск на дно в обох посудинах буде однаковий, хоча в першій посудині маса рідини буде значно менша, ніж у другій. Підтверджуючи своє відкриття, Паскаль опустив у діжку, вщерть залиту водою і герметично закриту, тонку довгу трубку з невеликою кількістю води, і спричинив руйнування діжки (мал. 93).

Рідина тисне не тільки на дно, а й на будь-яке тіло, занурене в рідину. Тому кажуть, що тиск рідини діє і всередині неї. У цьому рідина схожа на газ. Але якщо в газі тиск виникає внаслідок руху молекул, то в рідині тиск виникає і внаслідок

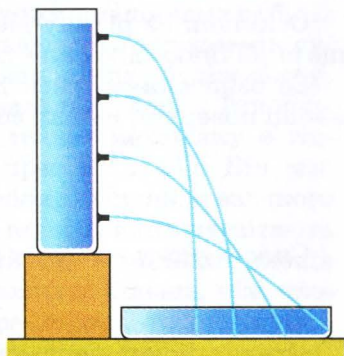
Отже, тиск рідини залежить лише від густини рідини та висоти її стовпа.



Мал. 92. Тиск рідини не залежить від форми посудини



Мал. 93. Дослід Паскаля з діжкою



Мал. 94. Тиск рідини залежить від висоти стовпа рідини

96

дії сили тяжіння. Це приводить до того, що в рідині на різних глибинах тиск різний. Щоб переконатися в цьому, візьмо високу посудину, в стінці якої на різній висоті є невеликі отвори. Якщо в посудину залили рідину, то вона вилитиметься через отвори (мал. 94). Але швидкість витікання буде найбільшою біля дна, що може бути лише тоді, коли тиск тут буде найбільшим. У міру наближення до поверхні тиск зменшуватиметься. Цей дослід підтверджує одночасно як залежність вагового тиску від висоти стовпа рідини, так і дію закону Паскаля.

Задача. Який тиск діє на нижню і верхню поверхні кубика, який знаходиться у воді, якщо довжина його ребра дорівнює 5 см, а глибина занурення верхньої грані – 10 см?

Дано:

$$a = 5 \text{ см},$$

$$h_1 = 10 \text{ см}.$$

$$p_1 - ?$$

$$p_2 - ?$$

Розв'язання

На верхню грань кубика діє тиск стовпа рідини заввишки h_1 :

$$p_1 = g\rho_v h_1.$$

Тиск рідини на нижню грань визначається стовпом води заввишки

$$h_2 = h_1 + a.$$

За законом Паскаля цей тиск діє знизу вгору:

$$p_2 = g\rho_v h_1 = g\rho_v (h_1 + a);$$

$$p_1 = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \text{ м} = 0,98 \text{ кПа};$$

$$p_2 = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,15 \text{ м} = 1,47 \text{ кПа}.$$

Відповідь. На верхню грань діє тиск 0,98 кПа; на нижню – 1,47 кПа.



§ 31. Як людина досліджує водні глибини

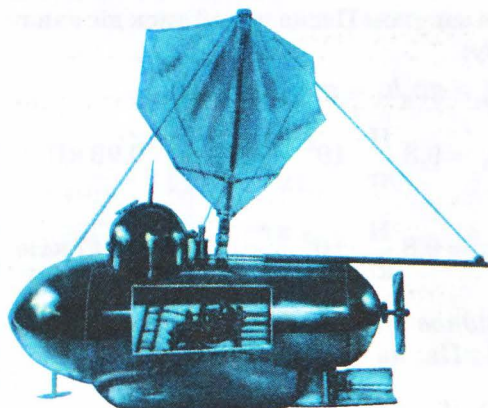
97

Життя людини тісно пов'язане з процесами, які відбуваються у природних водоймах – річках, озерах, морях, океанах. Там не тільки живуть різні тварини, а й знаходяться природні копалини, багато пам'яток людської культури, які з різних причин у різні часи й епохи опинилися на дні. Зрозуміло, що людина прагне дослідити водні глибини, щоб використати природні багатства і задовольнити свою природну цікавість. Проте при цьому людина стикається з дією вагового тиску води, який зростає з глибиною і суттєво обмежує глибину занурення людини у воду. Таку зміну тиску з глибиною відчувають на собі люди, які за фаховими обов'язками повинні працювати в глибинах водойм. Якщо в легкому костюмі водолаз може працювати на глибині не більше як 100 м, то для дослідження глибин морів і океанів, що в багатьох випадках сягають кількох кілометрів, доводиться виготовляти спеціальні скафандри або глибинні апарати – батисфери і батискафи.

Батисфера (мал. 95) – це міцна стальна куля із вікном з товстого і міцного скла. Всередині кулі перебувають спостерігачі, які підтримують телефонний зв'язок з людьми на поверхні моря. Батисферу опускають у море на міцному тросі, який дає змогу зробити безпечним процес спуску і піднімання апарата.



Мал. 95. Батисфера



Мал. 96. Батискаф Пікара

Батискаф (мал. 96) не зв'язаний тросом із кораблем. Він має власний двигун і може переміщуватися в будь-якому напрямі на великій глибині. Найбільша глибина, якої досягла людина в батискафі, становить понад 10 км.

98



1. Чому виникає тиск рідини?
2. Від чого залежить тиск рідини?
3. Чи залежить тиск рідини від форми посудини?
4. Чи однаковий тиск у різних рідинах?
5. Як людина запобігає дії на організм великого тиску рідини?

Вправа 17

1. Обчислити тиск рідини, густина якої дорівнює $1800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, на дно циліндричної посудини, якщо висота її рівня становить 10 см.

2. Висота водонапірної башти водогону дорівнює 75 м. Який тиск у водогінній трубі біля основи башти?

3. Водолаз занурюється в море на глибину 90 м. Визначити тиск води на цій глибині. Густина морської води становить

$1030 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

4. На певній глибині в океані прилади батискафа показали тиск 41,2 МПа. На яку глибину занурився батискаф?

5. На яку глибину потрібно занурити батискаф, щоб тиск води на його поверхню дорівнював 6190 кПа?

6. Обчислити тиск нафти на дно бака, якщо її рівень знаходиться на відстані 9,5 м від дна. Визначити силу тиску на дно, якщо його площа становить 290 м^2 .

§ 32. Сполучені посудини

Дві або більше посудини, сполучені трубками і заповнені рідиною, називають *сполученими посудинами*.

Що відбувається у сполучених посудинах

Візьмемо дві циліндричні скляні посудини, сполучені між собою трубкою (мал. 97). В одній із них (праворуч) розмістимо дуже легкий поршень, який щільно прилягає до стінок і може вільно переміщуватися в трубці вгору і вниз.

Притримаємо поршень і почнемо заливати в ліву посудину воду доти, доки висота стовпа в ній дорівнюватиме h_1 . Під поршнем висота стовпа дорівнюватиме h_2 . Причому $h_1 > h_2$.

Якщо звільнити поршень, то внаслідок різниці тисків поршень почне переміщуватися вгору доти, доки рівень рідини в обох посудинах не стане однаковим. Це можливо буде тоді, коли висоти стовпів рідини в обох посудинах будуть однаковими:

$$p_1 = p_2;$$

$$\rho_p g h_1 = \rho_p g h_2;$$

$$h_1 = h_2.$$

Зрозуміло, що так буде тоді, коли в обох посудинах буде однорідна рідина.

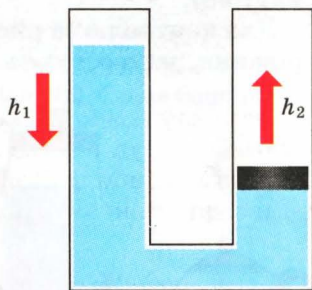
Що відбувається в сполучених посудинах з різними рідинами

Якщо в різних посудинах будуть різні рідини і $\rho_1 < \rho_2$, то $h_1 > h_2$. Але завжди

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2,$$

або

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}.$$



Мал. 97. Рівні рідини в сполучених посудинах вирівнюються

У сполучених посудинах однорідна рідина встановлюється на одному рівні.





§ 33. Застосування сполучених посудин

Властивості сполучених посудин широко застосовуються в побуті, техніці, на виробництві.

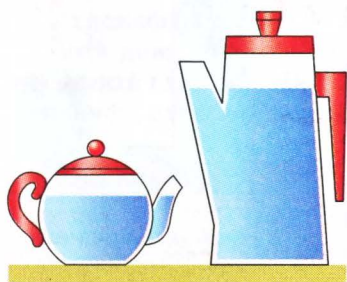
Усім відомий чайник з носиком є сполученими посудинами. Кінчик носика чайника розміщено так, що він перебуває на рівні кришки чайника. Тому залита в чайник вода не виливається, коли посудина стоїть на горизонтальній поверхні (мал. 98).

Для контролю за рівнем води в парових котлах під час її нагрівання застосовують водомірне скло (мал. 99). Це скляна трубка, нижній кінець якої розміщений нижче від рівня води в котлі. А верхній кінець з'єднаний із простором котла над рівнем води. За показами водомірного скла можна дізнатися про рівень води в котлі, не відкриваючи його.

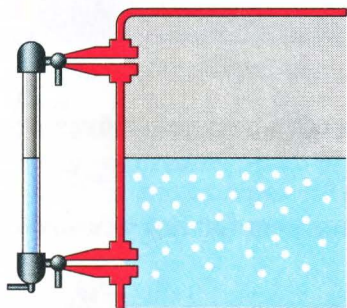
У невеликих селищах діють системи водогонів, які побудовані за принципом сполучених посудин (мал. 100). Обов'язковим елементом такої системи є так звана водонапірна башта – металевий або бетонний резервуар, піднятий на таку висоту, щоб рівень води в ньому був вищий за будівлі, в які подається вода. Водяний насос при потребі наповнює резервуар водою. А з башти вода самоплинно трубами надходить до споживачів згідно із законом сполучених посудин.

За принципом сполучених посудин працюють також шлюзи (мал. 101), за допомогою яких судна долають різні перешкоди на річках: пороги, греблі, мілини тощо. Шлюзи є системою камер, які мають водонепроникні ворота.

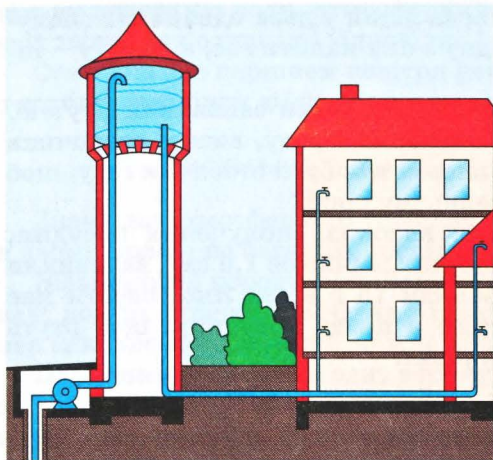
Якщо судно йде вниз за течією, то воно заходить у верхню камеру, ворота якої після цього закриваються. Вода з камери випускається в нижню камеру доти, доки її рівень не зрівняється з рівнем води у нижній камері. Тоді відкриваються



Мал. 98. Чайники як сполучені посудини

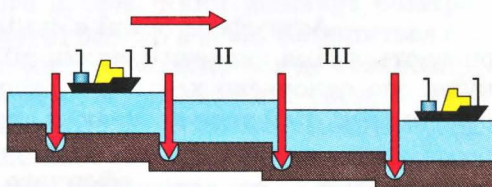


Мал. 99. Водомірне скло



Мал. 100. Схема баштового водогону

Мал. 101. Принцип сполучених посудин у роботі шлюзів



101

другі ворота і судно виходить з камери, щоб вільно пливти далі річкою. Подібним чином судна також піднімаються вгору проти течії. Але в цьому випадку камера заповнюється водою доти, доки її рівень не зрівняється з верхнім рівнем річки. Такі шлюзи, як правило, будують на судноплавних річках, на яких збудовані водонапірні греблі.

1. Як розподіляється рідина в сполучених посудинах?
2. Як впливає густина рідини на положення рівня рідини в сполучених посудинах?
3. Якщо сполучені посудини залиті різними рідинами, яким буде їхній рівень?
4. Як за допомогою сполучених посудин визначити густину рідин?
5. Який закон природи діє в сполучених посудинах?



Вправа 18

1. Чому водонапірна башта водогону має бути вищою за всі будинки, які постачаються водою?

2. Який установиться рівень рідин у двох однакових сполучених посудинах, якщо в одну з них налити гас, а в другу – такий самий об'єм води?

3*. Нижню частину U-подібної трубки заповнили ртуттю. У ліве коліно налили гас, а в праве – воду, висота стовпчика якої становить 48 см. Якої висоти має бути стовпчик гасу, щоб ртуть залишалася на попередньому рівні?

4*. Нижню частину двох високих сполучених посудин, площа поперечного перерізу яких дорівнює $1,5 \text{ см}^2$, заповнили ртуттю. У ліву посудину залили 75 г води. Якої висоти має бути стовпчик гасу, налитого в праву посудину, щоб ртуть залишалася на тому самому рівні?

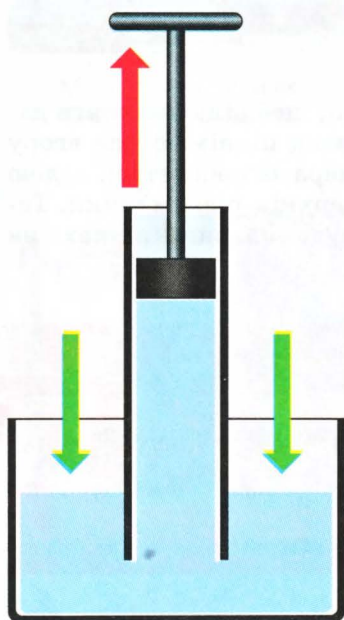
§ 34. Атмосферний тиск. Дослід Торрічеллі

102

Атмосфера Землі є сумішшю різних газів, які утримуються біля планети завдяки дії сили тяжіння на їх молекули, що одночасно хаотично і неперервно рухаються, створюючи тиск. Цей тиск називають атмосферним.

Підтвердити існування атмосферного тиску можна простими дослідями.

Які наслідки дії атмосферного тиску



Мал. 102. Вода піднімається за поршнем унаслідок дії атмосферного тиску

Якщо взяти трубку з поршнем, опустити її одним кінцем у посудину з водою і підіймати поршень угору, то вода підніматиметься за поршнем (мал. 102). Це можливо лише тоді, коли тиск води у посудині буде більшим, ніж під поршнем. За рахунок вагового тиску вода не зможе підніматися, оскільки рівень води під поршнем більший, ніж у посудині, а тому і його тиск більший. Вода повинна вилитися назад у посудину. Отже, на рідину в посудині діє додатковий тиск, більший за ваговий тиск стовпа води під поршнем. Цей тиск створюють молекули атмосферного повітря. Діючи на

вільну поверхню води, атмосферний тиск у воді передається в усіх напрямках однаково відповідно до закону Паскаля.

Оскільки під поршнем повітря немає, то вода буде заходити в трубку внаслідок дії незрівноваженого тиску.

Наскільки великий атмосферний тиск

Значення атмосферного тиску досить велике. Переконатися в цьому можна на багатьох дослідах.

Візьмемо дві порожнисті півкулі, які мають добре відшліфовані поверхні перерізів. Одна з півкуль має спеціальний штуцер із краном, через який можна відкачувати повітря.

Підвісимо на штативі одну з півкуль, приєднаємо до неї знову другу півкулю і почнемо відкачувати насосом через кран повітря з порожнини. Нижня півкуля, міцно притиснеться до верхньої. Це можливо лише тоді, коли тиск у порожнині кулі буде меншим, ніж зовні.

Внаслідок дії повітряного насоса, який відкачує повітря, тиск у порожнині півкуль зменшиться, а зовні залишиться без зміни. Тому нижня півкуля міцно притиснеться до верхньої.

Про значення сили при деякому зменшенні тиску в кулі можна судити за масою вантажу, який може утримуватися, якщо його підвісити до нижньої півкулі. Якщо ж відкрити кран і в порожнину кулі впустити повітря, то нижня півкуля разом із вантажем відпаде.

Як почали досліджувати атмосферний тиск

Подібний дослід провів і описав у 1654 р. німецький фізик, бургомістр міста Магдебурга Отто Геріке.



Отто Геріке (1602–1686) – німецький фізик, який експериментально вивчав атмосферний тиск. За допомогою «магдебурзьких півкуль» він продемонстрував дію атмосферного тиску. Вивчав також електричні явища, пояснив природу тертя. Сконструював першу електричну машину.



Ця подія залишилася в історії науки завдяки образній граюрі тих часів (мал. 103).

У сучасному виробництві застосовується багато пристроїв, які використовують атмосферний тиск. Для розрахунку результатів їх роботи потрібно знати значення атмосферного тиску.



Мал. 103. Один із дослідів Геріке

Спосіб вимірювання атмосферного тиску вперше запропонував італійський учений Еванджеліста Торрічеллі.

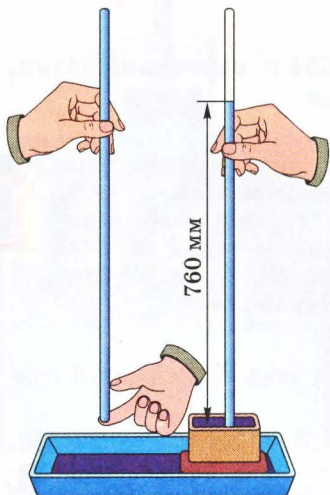


Еванджеліста Торрічеллі (1608–1647) – італійський учений.

Перший виміряв атмосферний тиск за допомогою сконструйованого ним ртутного барометра. Довів, що висота ртутного стовпа барометра становить приблизно $1/14$ висоти водяного стовпа.

104

Він виявив, що коли закриту з одного боку трубку заповнити вщерть ртуттю, перевернути і опустити в посудину зі ртуттю, то вилетіться лише частина цієї ртуті (мал. 104). Висота стовпчика становила в його дослідах приблизно 760 мм. За результатами дослідів вчений зробив висновок, що тиск ртутного стовпчика зрівноважується атмосферним тиском, який діє на вільну поверхню ртуті в посудині. Атмосферний тиск за таких умов зазвичай називають *нормальним*. З того часу в науку ввійшла одиниця вимірювання атмосферного тиску – міліметр ртутного стовпчика (мм рт. ст.).



Як розрахувати атмосферний тиск

Виразимо тиск стовпчика ртуті висотою 760 мм (нормальний) у системних одиницях тиску – паскалях.

З попередніх параграфів відомо, що ваговий тиск рідини розраховується за формулою:

Мал. 104. Дослід Торрічеллі

$$p = \rho_p g h.$$

Враховуючи, що густина ртуті становить $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, одержуємо

$$p = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 0,76 \text{ м} = 101\,292,8 \text{ Па.}$$

1. Чому існує атмосферний тиск?
2. Хто вперше виміряв атмосферний тиск?
3. Чому не виливається ртуть із трубки в досліді Торрічеллі?
4. Який атмосферний тиск вважається нормальним?
5. Як розрахувати значення атмосферного тиску в паскалях за результатами досліді Торрічеллі?



Вправа 19

1. Виразити в кілопаскалях атмосферний тиск 800 мм рт. ст.; 500 мм рт. ст.; 530 мм рт. ст.
2. Визначити висоту стовпа ртуті, який зрівноважується атмосферним тиском в 900 гПа; 1100 гПа; 970 гПа.
3. Якої довжини має бути трубка для проведення досліді Торрічеллі з використанням води?
4. Якої висоти водяний стовп зрівноважить атмосферний тиск 500 мм рт. ст.?

105

§ 35. Барометри

Проводячи досліді з трубкою зі ртуттю, Торрічеллі помітив, що висота стовпчика ртуті час від часу змінювалася. Звідси він зробив висновок, що атмосферний тиск не залишається сталим – він змінюється.

Особливо помітною була зміна висоти стовпчика ртуті в досліді Торрічеллі, який показував значення атмосферного тиску перед зміною погоди. Помітивши таке явище, вчений зробив висновок, що так можна передбачати погоду. Щоб не використовувати щоразу лінійку для вимірювань висоти стовпчика, до трубки прикріпили нерухому шкалу з міліметровими поділками. Отриманий прилад назвали **барометром** (лат: baros – вага; metro – міряю).

Барометр можна використовувати для вимірювання висоти

Користуючись ртутним барометром, французький учений Блез Паскаль виміряв атмосферний тиск на різних висотах. Так група його учнів піднялася на гору То-де-Дам (Франція)

і з'ясувала, що з підніманням угору висота ртутного стовпчика в барометрі зменшується. На вершині гори стовпчик ртуті був на 7,5 см коротший, ніж біля підніжжя.

Проведені дослідження показали, що за змінами атмосферного тиску можна розраховувати висоту піднімання над поверхнею Землі. Якщо висота піднімання не перевищує кількох сотень метрів, то можна вважати, що при підніманні на кожні 12 м атмосферний тиск зменшується на 1 мм рт. ст., або на 100 Па кожні 8 м.

Задача. Біля підніжжя гори барометр показує тиск 740 мм рт. ст., а на вершині – 720 мм рт. ст. Яка висота гори?

Дано:

$$p_1 = 740 \text{ мм рт. ст.},$$

$$p_2 = 720 \text{ мм рт. ст.}$$

$H = ?$

Розв'язання

Різниця тисків біля підніжжя гори та на її вершині

$$p_2 - p_1 = 740 \text{ мм рт. ст.} - 720 \text{ мм рт. ст.} = 20 \text{ мм рт. ст.}$$

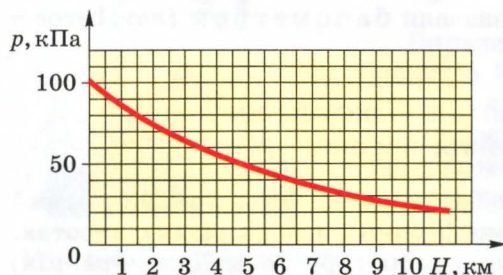
Оскільки кожні 12 м тиск зменшується на 1 мм рт. ст., то висота гори дорівнює

$$H = 20 \text{ мм рт. ст.} \cdot \frac{12 \text{ м}}{1 \text{ мм рт. ст.}} = 240 \text{ м.}$$

Відповідь. Висота гори 240 м.

При більших висотах зміна тиску відбувається за складнішим законом (мал. 105). Це пов'язано з тим, що з підніманням угору зменшується не тільки висота стовпа повітря, а і його густина.

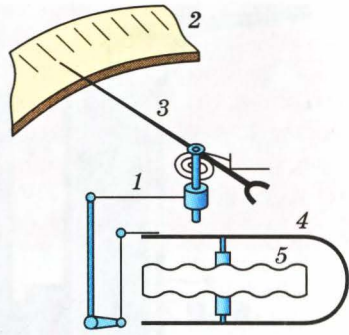
Барометри набули широкого поширення як засоби передбачення змін погоди. Але ртутні барометри виявилися непридатними для цього через велику масу, ненадійність конструкції та токсичність ртуті. У наш час користуються безртутними барометрами, які називають анероїдами (мал. 106).



Мал. 105. Залежність атмосферного тиску від висоти над рівнем Світового океану

Яка будова анероїда

Головною частиною анероїда є металева коробочка 5 з хвилястою поверхнею, з якої відкачане повітря. Щоб коробочку не сплющило атмосферне повітря, її поверхні утримуються металевою пружиною 4. При зміні атмосферного тиску коробочка деформується, а спеціальний механізм 1 передає ці деформації стрілці 3, яка показує на шкалі 2 значення тиску.



Мал. 106. Схема будови барометра-анероїда

Шкала анероїда градується через співставлення його показів із показами ртутного барометра, який фактично є еталоном приладом.

За принципом анероїда працює також альтиметр – прилад, яким вимірюють висоту польоту на невеликих літаках. Його шкала відградуєвана безпосередньо в одиницях висоти.

1. Чому атмосфера утримується біля Землі?
2. Чи однакова густина повітря на всіх висотах?
3. Яка залежність між висотою і атмосферним тиском?
4. Як за змінами атмосферного тиску можна визначити висоту?



Вправа 20

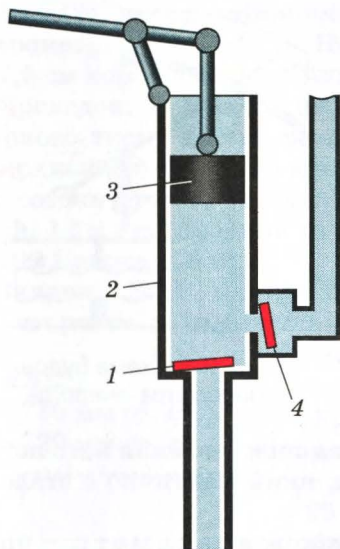
1. Чому висотні літаки мають герметичну кабінку?
2. У класі барометр показує тиск 756 мм рт. ст., а в цей самий час біля річки – 760 мм рт. ст. На якій висоті над рівнем річки знаходиться школа?



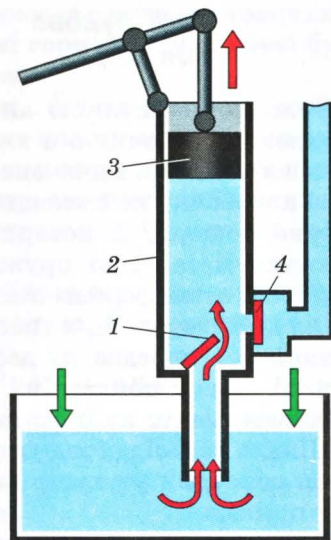
§ 36. Рідинний поршневий насос

Одним із приладів, який діє завдяки атмосферному тиску, є рідинний поршневий насос. Він складається з циліндра 2, поршня 3 і двох клапанів: впускного 1 і випускного 4 (мал. 107).

Поршень щільно прилягає до внутрішньої поверхні циліндра. Тому, коли він рухається вгору (мал. 108), тиск під ним унаслідок збільшення об'єму зменшується і рідина під дією атмосферного тиску заходить у циліндр, відкриваючи при цьому впускний клапан.

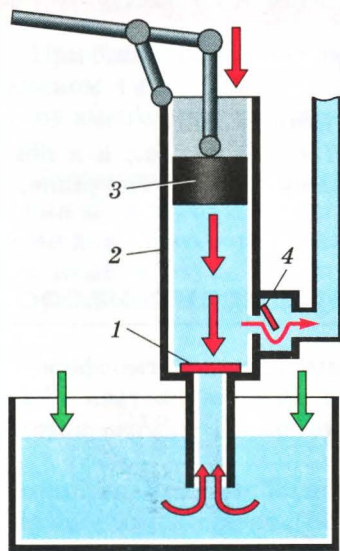


Мал. 107. Схема будови поршневого водяного насоса



Мал. 108. Поршень насоса рухається вгору

Випускний клапан при цьому буде закритим, оскільки на нього діє незрівноважений атмосферний тиск. Коли циліндр заповниться водою (мал. 109), поршень починає рухатися вниз і створювати деякий тиск, який за законом Паскаля передається на клапани. Внаслідок цього нижній клапан закривається, а випускний відкривається і пропускає рідину з циліндра назовні. Тиск поршня на рідину в циліндрі може бути досить великим, тому цей насос здатний піднімати воду на значну висоту, обмеження якої – тільки рівень досконалості конструкції і технології виготовлення насоса.



Мал. 109. Поршень насоса рухається вниз

Але всмоктувати воду цей насос може тільки з глибини, не більшої за 9,8 м. Лише на таку висоту може підняти воду атмосферний тиск. Тому для відкачування води з глибоких колодязів насоси опускають до рівня, значно меншого за 9,8 м.

1. Чому можлива дія поршневого насоса?
2. З яких частин складається водяний насос?
3. Яке призначення клапанів?
4. Яку роль виконує поршень?
5. Чому обмежена висота розміщення поршневого насоса над рівнем води?
6. Як можна за допомогою поршневого насоса підняти воду на висоту, більшу за 10 метрів?



§ 37. Виштовхувальна сила. Закон Архімеда

Коли взаємодіють тверді нерухомі тіла, діючи одне на одне, вони лише деформуються. І дія кожного з цих тіл на інше характеризується силою.

Як взаємодіє тверде тіло з рідиною

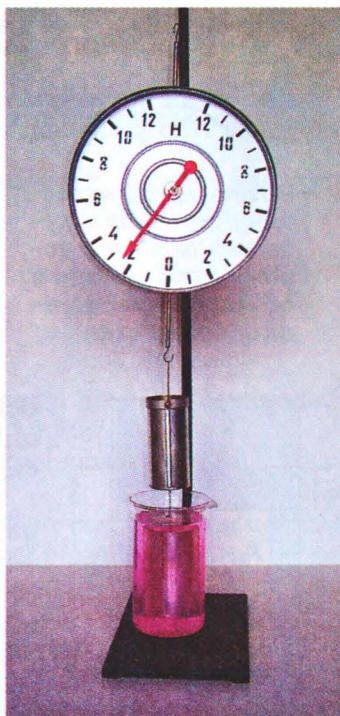
109

Якщо ж тверде тіло взаємодіє з рідиною, то воно проникає в рідину. Що відбувається в такому випадку? Відповідь на це запитання можна отримати з досліду.

До гумової нитки підвісимо важок і виміряємо довжину нитки, яка розтягується вагою важка. Якщо ж важок після цього зануримо у воду, то стане помітним скорочення нитки. Отже, вага тіла в рідині стала меншою. Це можливо тільки тому, що в рідині на занурене тіло діє виштовхувальна сила. Напрямок цієї сили завжди протилежний до напрямку сили тяжіння.

Як розрахувати
значення
виштовхувальної
сили

Досліди показують, що значення виштовхувальної сили залежить як від характеристик зануреного тіла, так і від властивостей рідини.



Мал. 110. Дослід, що підтверджує закон Архімеда

Візьмемо металеві циліндр і склянку, місткість якої дорівнює об'єму циліндра. Підвісимо їх разом до гачка динамометра і визначимо вагу циліндра і склянки (мал. 110). Тепер повністю зануримо циліндр у воду. Динамометр покаже зменшення ваги. Але якщо в склянку вщерть налити води, то покази динамометра відновляться. Отже, виштовхувальна сила дорівнює вазі води, об'єм якої дорівнює об'єму тіла. Якщо воду замінити насиченим розчином солі у воді, то виштовхувальна сила буде більшою, оскільки буде більшою вага рідини, об'єм якої дорівнює об'єму тіла.

Якщо врахувати, що вага рідини $P = gm = \rho_p g V_T$, то для розрахунку виштовхувальної сили можна застосовувати формулу

$$F_{\text{вишт}} = \rho_p g V_T.$$

Тут $F_{\text{вишт}}$ – виштовхувальна сила; ρ_p – густина рідини; V_T – об'єм зануреного в рідину тіла або його частини.

Залежність, виражена формулою для виштовхувальної сили, називається *законом Архімеда*, а сама виштовхувальна сила – *силою Архімеда*.

110

Від чого залежить сила Архімеда

Чому ж діє сила Архімеда в рідині? Уявімо собі, що в рідину занурене тіло у вигляді прямокутного бруска (мал. 111). Внаслідок дії сили тяжіння в рідині існує тиск, який за законом Паскаля діє в усіх напрямках. У зв'язку з цим на верхню грань бруска діятиме сила $F_1 = \rho_p g h_1 S$, яка спрямована вниз.

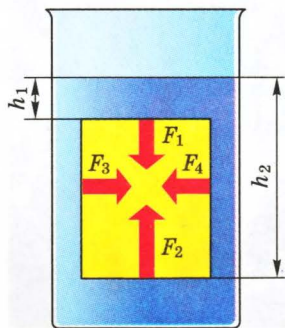


На тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини в об'ємі зануреного тіла або його частини.

На нижню грань діятиме сила $F_2 = \rho_p g h_2 S$, спрямована вгору. Оскільки $h_2 > h_1$, то і $F_2 > F_1$. Рівнодійна цих сил напрямлена вгору. Це і буде сила Архімеда.

Сила Архімеда діє і в газах. Адже в них також тиск змінюється з висотою. Остаточний закон Архімеда можна сформулювати так: на тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини або газу в об'ємі цього тіла.

У газах сила Архімеда значно менша, ніж у рідинах, оскільки густина газу набагато менша від густини рідини.



Мал. 111. Так виникає сила Архімеда

1. Як діє рідина на занурене в неї тіло?
2. Чи залежить сила Архімеда від густини тіла, зануреного в рідину?
3. Як залежить архімедова сила від густини рідини чи газу?
4. Як залежить сила Архімеда від об'єму зануреного в рідину тіла?
5. Як формулюється закон Архімеда?
6. Чи діє закон Архімеда в умовах невагомості?
7. Чому виникнення сили Архімеда пов'язують із дією закону Паскаля?



I ♥ you

Вправа 21

1. Чому спеціально навчена собака легко витягує потопачого з води, але не може зрушити його на землі?

2. Чому всі водяні рослини можуть функціонувати, маючи довгі й м'які стебла?

3. Чи однакова вага тонни сталі і тонни алюмінію, зважених у повітрі?

4. Чи однакова сила Архімеда діятиме у воді на тіло на Місяці і на Землі?

5. У воду занурено брусок міді масою 10 г і тонка мідна пластинка такої самої маси. Чи однакова виштовхувальна сила діє на них?

6. На гачку пружинного динамометра висить вантаж об'ємом 130 см^3 і масою 1 кг. Що покаже динамометр, якщо вантаж занурити у воду? У бензин?

7. На тіло, яке перебуває у воді, діє сила Архімеда 2700 Н. З якою силою це тіло виштовхувалося б гасом?

8. Повітряна куля має об'єм 300 м^3 . Визначити виштовхувальну силу повітря, що діє на неї.

9. На шматок корка, зануреного у воду, діє сила Архімеда, що дорівнює 49 Н. Який об'єм шматка корка?

2.013 10. Один кубічний метр корка у повітрі важить 2000 Н. Яка його вага в безповітряному просторі?

11. Визначити силу Архімеда, що діє на тіло, яке при повному зануренні в гас витіснило 250 см^3 цієї рідини.

§ 38. Умови плавання тіл

Згідно із законом Архімеда, на всі тіла, занурені в рідину, діють виштовхувальні сили, значення яких залежать від об'ємів цих тіл і густини рідини. Отже, якщо тіла мають

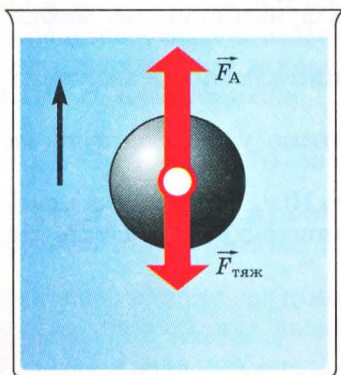
однакові об'єми, то і виштовхувальні сили, які діятимуть на них у даній рідині, будуть однаковими. Чому ж тоді одні тіла тонуть у рідині, а інші спливають?

Чому тіла плавають або тонуть

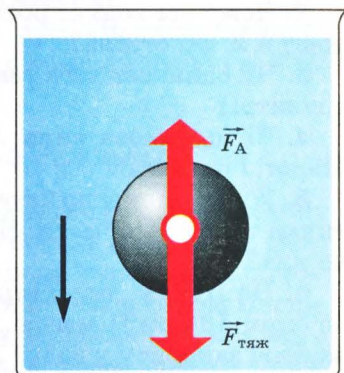
Для прикладу візьмемо дві кульки однакового об'єму, але одну металеву, а другу – дерев'яну. Зважування їх на терезах покаже, що вага дерев'яної кульки менша, ніж вага металевої. Спливання дерев'яної кульки, зануреної у рідину, показує, що рівнодійна сили тяжіння і сили Архімеда напрямлена вгору, в напрямі дії сили Архімеда. Отже, в цьому випадку сила Архімеда більша за силу тяжіння (мал. 112).

У випадку з металевою кулькою рівнодійна напрямлена вниз. Тобто сила тяжіння більша за силу Архімеда (мал. 113).

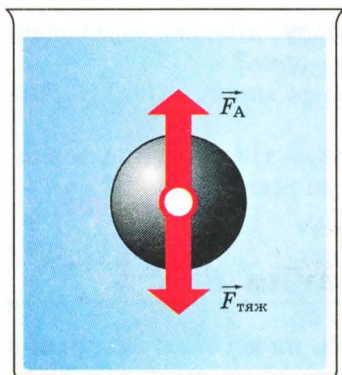
112



Мал. 112. Тіло спливає



Мал. 113. Тіло тоне



Мал. 114. Тіло плаває в рідині

За рівності сил Архімеда і тяжіння, що діють на занурене в рідину тіло, рівнодійна дорівнюватиме нулю (мал. 114). Отже, в цьому випадку занурене в рідину тіло буде знаходитися в рівновазі в будь-якій точці рідини.

Проте виміряти силу тяжіння чи силу Архімеда незавжди можна, або це незручно. А тому і передбачити поведінку тіла в рідині незавжди можна. Щоб знайти вихід із положення, виконаємо розрахунки.

Коли тіла тонуть у рідині

На кожне тіло, що міститься в рідині, діють дві сили: сила Архімеда $F_A = \rho_p g V_T$ і сила тяжіння $F_{\text{тяж}} = \rho_T g V_T$.

Для випадку, коли тіло тоне в даній рідині:

$$F_A < F_{\text{тяж}}; \quad \rho_p g V_T < \rho_T g V_T;$$

$$\rho_p < \rho_T.$$

Налита у склянку з водою ртуть опускається на дно (мал. 115).

Тіло тоне, якщо його середня густина більша, ніж густина рідини.



Коли тіло не спливає і не тоне

Подібним чином досягається здатність різних суден плавати на поверхні води. Вага води, витісненої підводною частиною судна, дорівнює вазі самого судна. Очевидно, що чим більша вага даного судна, тим більша глибина його занурення у воду.

Коли тіла спливають у рідині

Якщо тіло спливає, то

$$F_A > F_{\text{тяж}},$$

або

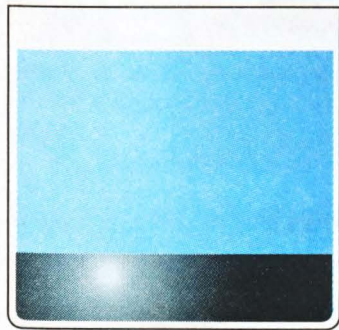
$$\rho_p g V_T > \rho_T g V_T.$$

Звідси

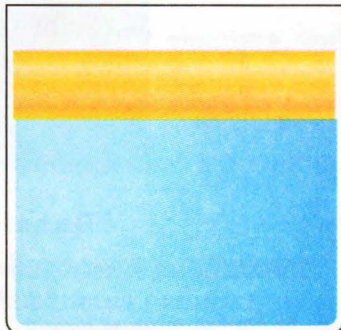
$$\rho_p > \rho_T.$$

Налита у склянку олія спливає на поверхню води, оскільки густина олії менша за густину води (мал. 116). Щоб переконатися в цьому, варто поглянути в таблицю густин на с. 52.

Тіло спливає, якщо його середня густина менша за густину рідини.



Мал. 115. Ртуть тоне у воді і опускається на дно



Мал. 116. Олія плаває на воді

Гідростатичне зважування

На цьому принципі базується метод так званого гідростатичного зважування. Якщо в мензурку опустити дерев'яний брусок, то він буде плавати, але рівень води підніметься. Об'єм цієї води дорівнює об'єму зануреної частини бруска, а її вага – вазі бруска. Знаючи об'єм і густину води, можна розрахувати вагу води, а разом з цим і вагу тіла. Для випадку тіл, які важчі за воду, виготовляють спеціальний поплавок, який дає змогу тілу плавати на поверхні.



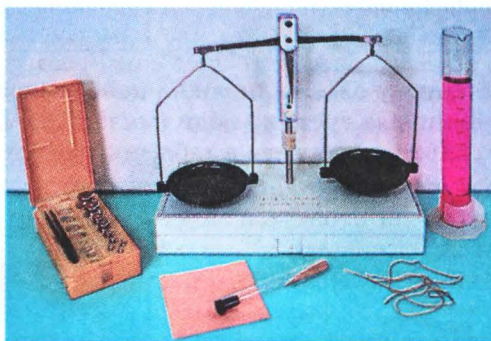
1. Коли тверде тіло спливає в рідині?
2. Коли тверде тіло тоне в рідині?
3. Як, не знаючи ні маси, ні об'єму тіла, передбачити його поведінку у відомій рідині?
4. На чому ґрунтується плавання суден?
5. Як можна визначити вагу тіла, не маючи динамометра чи терезів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

З'ясування умов плавання тіл

Мета. Експериментально встановити умови плавання тіл.

Обладнання: мензурка з водою, пробірка з корком, важільні терези з набором важків, сухий пісок, фільтрувальний папір, дротяний гачок.



Вказівки до роботи

Положення тіла в рідині залежить від напряму рівнодійної сили тяжіння і сили Архімеда. Усі висновки, зроблені в параграфі 38, стосуються тіл, які повністю занурені у воду. Сила тяжіння визначається шляхом розрахунків за відомою масою, виміряною безпосереднім зважуванням тіла.

Архімедова сила розраховується за об'ємом пробірки, який визначається за показами мензурки при повному її зануренні. У цій роботі застосовується пробірка, об'єм якої залишається сталим. Тому й сила Архімеда буде сталою в усіх дослідах. Масу пробірки (і відповідно силу тяжіння, яка діє на неї) змінюють досипанням у неї сухого піску. Для підвищення точності при зважуванні пробірку щоразу висушують промокальним папером.

Металевий гачок дає можливість виймати пробірку з води, не занурюючи для цього руку в посудину.

Виконання роботи

1. Визначте ціну поділки мензурки.
 2. Підготуйте терези для зважування.
 3. Відкривши пробірку, засипте в неї на $\frac{3}{4}$ об'єму сухого піску.
 4. Закривши пробірку корком, обережно опустіть її в мензурку.
 5. Спостереженням установіть, в якому стані перебуває пробірка (плаває, тоне, спливає).
 6. Визначте об'єм пробірки за шкалою мензурки.
 7. Вийнявши за допомогою гачка пробірку з води і висушивши її фільтрувальним папером, знайдіть її масу за допомогою важільних терезів.
 8. Розрахуйте виштовхувальну силу та силу тяжіння, які діють на пробірку в рідині.
 9. Порівняйте силу тяжіння і силу Архімеда.
 10. Поступово відсипаючи пісок з пробірки, досягніть того, щоб занурена пробірка плавала в воді на будь-якій глибині, не спливаючи і не тонучи.
 11. Вийміть пробірку з води і, висушивши фільтрувальним папером, знайдіть її масу за допомогою терезів.
 12. Розрахуйте виштовхувальну силу і силу тяжіння, які діють на пробірку з піском.
 13. Порівняйте силу тяжіння і силу Архімеда для цього випадку.
 14. Відсипте пісок із пробірки, залишивши його об'єм близько $\frac{1}{5}$ від об'єму пробірки.
 15. За допомогою гачка занурте пробірку у воду і відпустіть.
 16. Простежте за поведінкою пробірки.
 17. Розрахуйте силу тяжіння і силу Архімеда та порівняйте їх.
- Результати вимірювань і розрахунків запишіть у таблицю і зробіть висновки.

Таблиця

Об'єм пробірки $V, \text{ м}^3$	Архіме- дова сила $F_A, \text{ Н}$	Маса пробірки з піском $m, \text{ кг}$	Сила тяжіння $F_{\text{тяж}}, \text{ Н}$	Порів- няння сил F_A і $F_{\text{тяж}}$	Спосте- режуване явище

18. **Додаткове завдання.** Повторіть п.15. Виміряйте об'єм зануреної частини пробірки, розрахуйте силу Архімеда і порівняйте її із силою тяжіння. Зробіть висновки.

Вправа 22

116

- Чому жир у гарячому супі збирається на поверхні?
- Чому порожня скляна пляшка плаває на поверхні води, а наповнена водою тоне?
- Чому мильна бульбашка, наповнена повітрям і опущена у вуглекислий газ, не падає на дно?
- Дерев'яний брусок, що плаває у воді, витісняє 0,5 л води. Яка вага бруска?
- На поверхні води у відрі плаває мідна каструля. Чи зміниться рівень води у відрі, якщо каструля потоне? Чому?
- Тіло, маса якого дорівнює 2,5 кг, повністю занурили у воду. Маса витісненої води виявилася 2 кг. Потоне це тіло в рідині чи спливе на поверхню?
- Як визначити масу дерев'яної кульки, маючи мензурку з водою?
- Теплохід переходить із річки в море. Порівняйте виштовхувальні сили, які діють на нього в річці і морі.
- Із човна зійшла людина масою 75 кг, а замість неї в човен сіли двоє дівчаток: маса однієї становить 32 кг, а другої – 37 кг. Як змінилася при цьому глибина занурення човна у воду?
- Океанський нафтоналивний танкер витісняє 82 800 т води. Яка вага танкера з вантажем? Який об'єм його підводної частини?
- Теплохід, вага якого дорівнює 20 000 кН, має максимальний об'єм підводної частини 6000 м³. Який вантаж можна на нього завантажити?



§ 39. Плавання суден

Людина здавна мріяла про подолання водних просторів. Спочатку вона пристосувала для цього дерев'яні колоди, плоти, а потім почала будувати дерев'яні човни і кораблі.

Для виготовлення сучасних суден використовують різні метали. З металу виготовляється корпус судна, його конструктивні елементи. Разом з тим судно має великий об'єм, не заповнений металом. Тому його середня густина менша за густину води.

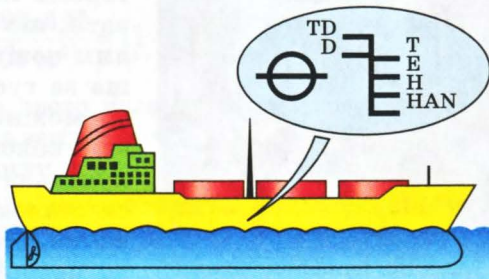
Коли нижня частина судна занурюється у воду, виникає сила Архімеда, яка дорівнює вазі витісненої води. За умовами плавання ця сила завжди дорівнює вазі судна. Якщо ж судно навантажують, то його вага збільшується і воно починає занурюватися у воду. Чим глибше занурюється судно, тим більшою стає сила Архімеда. Коли вона дорівнюватиме вазі судна, останнє перестане занурюватися. Глибину, на яку занурюється судно у воду, називають *осадкою* судна.

Осадка судна залежить від його ваги і маси вантажу, який знаходиться на судні. Збільшення маси вантажу приводить до збільшення осадки. Осадка зменшується, коли судно переходить із річки в море, де густина води становить 1030 кг/м^3 .

Осадка може змінюватися лише в певних межах, коли судно ще тримається на поверхні води. Щоб контролювати осадку судна, на його борт наносять горизонтальну лінію, яка отримала назву *ватерлінія* (від голландських слів *water* – вода та *lijn* – лінія) (мал. 117). Значення сили Архімеда, коли судно занурилося по ватерлінію, називають *водотоннажністю*.

Чисельно водотоннажність дорівнює силі тяжіння, яка діє на судно з вантажем. Найбільшу водотоннажність мають сучасні танкери. Вона сягає $5 \cdot 10^6 \text{ кН}$ і більше. Разом із вантажем ці судна мають масу $500\,000 \text{ т}$ і більше.

Якщо від водотоннажності відняти вагу судна, то отримаємо вагу вантажу, який може перевозити це судно. Це – *вантажопідйомність* судна.



Мал. 117. Ватерлінія на корпусі морського судна

Водний транспорт дуже зручний і вигідний. Перевезення вантажів водним транспортом значно дешевше, ніж іншими видами транспорту. Тому для подальшого його розвитку потрібно створювати досконаліші судна і водночас дбати про стан водних артерій країни, яким дуже шкодять промислові викиди та забруднення (відходи) із суден.

Україна має розвинений річковий і морський флот. Найбільшою судноплавною річкою України є Дніпро, фарватером якого плавають навіть судна типу «річка – море», які виходять із річки в море не перевантажуючи вантажів.

1. На чому базується явище плавання суден?
 2. Що таке осадка суден?
 3. Для чого на борт судна наносять ватерлінію?
 4. Що показує водотоннажність судна?
 5. Як визначити вагу вантажу, який знаходиться на судні?
 6. Чому широко застосовується перевезення вантажів водним транспортом?



§ 40. Повітроплавання

Багато хто мав нагоду спостерігати, як мильні бульбашки, наповнені теплим повітрям, спливають угору і тривалий час плавають у повітрі.



Мал. 118. Куля Монгольф'є

Підвісивши скляну колбу на одній із шальок рівноплечих терезів, можна зрозуміти причини плавання мильних бульбашок, гумових кульок. Для цього потрібно колбу спочатку зрівноважити важками, а потім під шийку колби ввести запалену спиртівку. Гаряче повітря буде заходити в колбу і рівновага терезів порушиться. Якщо врахувати, що колба наповнюється теплим повітрям, густина якого менша за густину холодного повітря, то можна зробити висновок, що вага колби зменшується, а виштовхувальна сила повітря залишається сталою. Згідно з умовами плавання, кулька піднімається вгору до певної висоти, коли газ у ній

оохолоне, а тиск атмосферного повітря зменшиться внаслідок збільшення висоти над поверхнею Землі.

Описане явище використовується для виготовлення апаратів, які можуть плавати в повітрі і перевозити певні вантажі. Уперше таку кулю виготовили у Франції в 1783 р. брати Монгольф'є. Оболонку кулі вони виготовили з цупкого паперу, а внутрішню порожнину заповнили гарячим повітрям (мал. 118).

Пізніше кулі стали виготовляти з гуми і наповнювати воднем або гелієм. Густина цих газів менша за густину повітря, що схоже на гаряче повітря в кулі Монгольф'є.

Повітряна куля, наповнена воднем, гелієм чи гарячим повітрям, може не лише сама піднятися в повітря, а й підняти певний вантаж. Масу цього вантажу можна вирахувати на основі закону Архімеда і умов плавання тіл.

Нехай куля, наповнена гелієм, має об'єм $V = 100 \text{ м}^3$. Маса гелію, яким наповнена куля, дорівнює

$$m_{\text{г}} = \rho_{\text{г}} V_{\text{к}}; \quad m_{\text{г}} = 0,18 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 100 \text{ м}^3 = 18 \text{ кг}.$$

Його вага становить

$$P_{\text{г}} = g m_{\text{г}}; \quad P_{\text{г}} = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 18 \text{ кг} = 176,4 \text{ Н}.$$

Вага повітря такого самого об'єму

$$P_{\text{п}} = g m_{\text{п}} = g \rho_{\text{п}} V_{\text{к}}; \quad P_{\text{п}} = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 100 \text{ м}^3 = 1274 \text{ Н}.$$

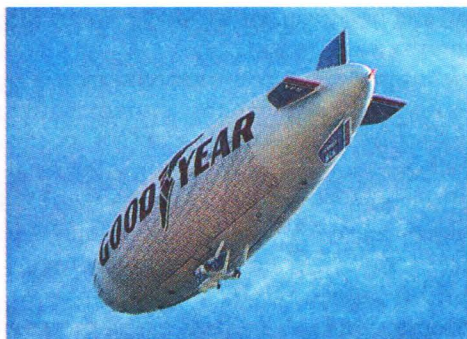
Згідно із законом Архімеда, ця сила дорівнює виштовхувальній силі повітря.

Отже, така куля може підняти в повітря вантаж вагою $1274 \text{ Н} - 176,4 \text{ Н} = 1097,6 \text{ Н}$. Цю вагу називають *підіймальною силою* кулі.

Для зручності розрахунків користуються таким поняттям, як *підіймальна сила* 1 м^3 газу. Так, відповідно до проведених вище розрахунків, підіймальна сила 1 м^3 гелію становить

$$F_{\text{г}} = \frac{1097,6 \text{ Н}}{100 \text{ м}^3} \approx 11 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

Поведінка аеростата, як часто називають повітряну кулю, відрізняється від поведінки зануреного в рідину тіла, густина якого менша за густину рідини. Якщо в рідині тіло спливає аж на поверхню, до межі рідини, то аеростат підіймається лише на певну висоту. Густина повітря зі збільшенням висоти поступово зменшується. Через це зменшується й сила Архімеда. Тільки-но



Мал. 119. Дирижабль

сила Архімеда зрівняється з вагою аеростата, піднімання припиниться. Для подальшого піднімання можна зменшити вагу аеростата, скинувши з нього баласт – вантаж, який заздалегідь завантажений у нього. Можливе також підігрівання газу, внаслідок чого збільшується об'єм кулі і зменшується густина газу в ній. Це збільшує підймальну силу кулі.

120

Аеростат не може самостійно переміщуватися в горизонтальному напрямі. Він рухається тільки під дією вітру, а пілот лише керує висотою підйому апарата.

На початку XX ст., коли авіація ще робила перші кроки, значного поширення набули дирижаблі (мал. 119). Це літальні апарати, легші за повітря, як і повітряні кулі. Їхня сигароподібна оболонка наповнювалася воднем або гелієм. Обладнані двигунами і повітряними гвинтами, дирижаблі могли перевозити пасажирів на значні відстані незалежно від напрямку вітру. І лише успішний розвиток авіації зменшив роль повітроплавання.

У наш час повітряні кулі невеликих розмірів використовують для дослідження верхніх шарів атмосфери. Кулі-зонди, що на відміну від ракет не забруднюють повітря, доставляють на велику висоту спеціальну апаратуру, яка за допомогою радіопередавача передає на Землю результати вимірювань. Повітряні кулі, наповнені теплим повітрям, служать спортсменам-аматорам.



1. За якою ознакою підбирають газ для наповнення аеростата?
2. Які гази зазвичай використовують для наповнення оболонки аеростата?
3. Що таке підймальна сила аеростата?
4. Як розрахувати підймальну силу повітряної кулі?
5. Чому повітряна куля має обмежену висоту підйому?
6. Які переваги використання повітряних куль як транспортного засобу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

Зважування тіл гідростатичним методом

Мета. Визначити густину твердого тіла і рідини методом гідростатичного зважування.

Обладнання: динамометр, склянки з водою та олією, гумова нитка (чи пружинка), швейна нитка, олівець, канцелярські кнопки, важіль, лінійка з міліметровими поділками, досліджуване тіло.

Ця робота є завершальним етапом вивчення механічних явищ у 8-му класі. Частину завдань учні можуть виконувати на уроці, а решту – самостійно вдома з наступним аналізом на уроках (п. 3 і 4). Як невідому рідину можна використати олію.

Теоретичні відомості

Гідростатичне зважування з давніх часів застосовується для визначення густини різних речовин. Для цього використовують закон Архімеда. Густина твердих тіл визначається подвійним зважуванням: спочатку тіло зважують у повітрі (при цьому в багатьох випадках нехтують виштовхувальною силою, що діє на тіло у повітрі), а потім – у рідині, густина якої відома (наприклад, у воді). Розглянемо методи визначення густин.

1. Якщо досліджуване тіло тоне у воді (його густина ρ_t більша за густину води ρ_v), то в такому разі використовують динамометр і склянку з водою.

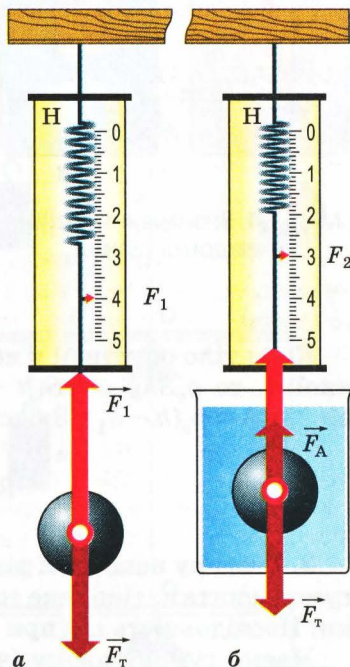
Спочатку досліджуване тіло зважують у повітрі (мал. 120, а):

$$F_1 = F_t = mg = \rho_t V_t g.$$

У цьому разі архімедовою силою, що діє на тіло у повітрі, можна знехтувати, оскільки густина повітря набагато менша за густину тіла і води.

Потім тіло опускають у склянку з водою (мал. 120, б), густина води відома ($\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$). У цьому разі на тіло, крім сил тяжіння F_t і пружності пружини динамометра F_2 , діє архімедова сила F_A :

$$F_2 = F_t - F_A = \rho_t V_t g - \rho_v V_t g.$$

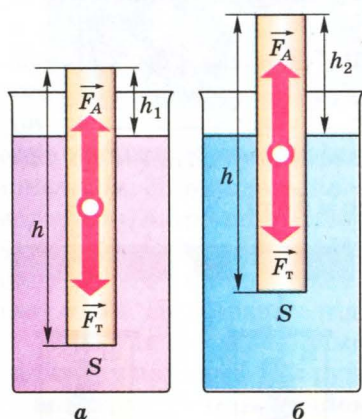


Мал. 120. Визначення густини тіла, що тоне у воді

Таким чином,

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\rho_T V_T g}{\rho_T V_T g - \rho_B V_T g} = \frac{\rho_T}{\rho_T - \rho_B};$$

$$\rho_T = \rho_B \frac{F_1}{F_1 - F_2}.$$



Мал. 121. Визначення густини невідомої рідини

2. Для вимірювання густини невідомої рідини можна скористатись також тілом, яке не тоне у воді та досліджуваній рідині, наприклад олівцем чи іншим тілом правильної форми. Щоб олівець стояв у рідині вертикально, до його нижнього кінця можна приколоти кілька кнопок або намотати кілька витків провідника.

Якщо олівець плаває у воді (мал. 121, а), то сила тяжіння \vec{F}_T , що діє на нього, дорівнює архімедовій силі \vec{F}_A . У цьому разі $\rho_T V_T g = \rho_B V_B g$, де $V_T = Sh$ – об'єм тіла, а $V_B = S(h - h_1)$ – об'єм витісненої тілом води (об'єм зануреної частини тіла).

Коли тіло опустити у невідому рідину (мал. 121, б), густина якої ρ , то $\rho_T Shg = \rho S(h - h_2)g$. З одержаних рівнянь маємо $\rho(h - h_2) = \rho_B(h - h_1)$. Звідси

$$\rho_T = \rho_B \frac{h - h_1}{h - h_2}.$$

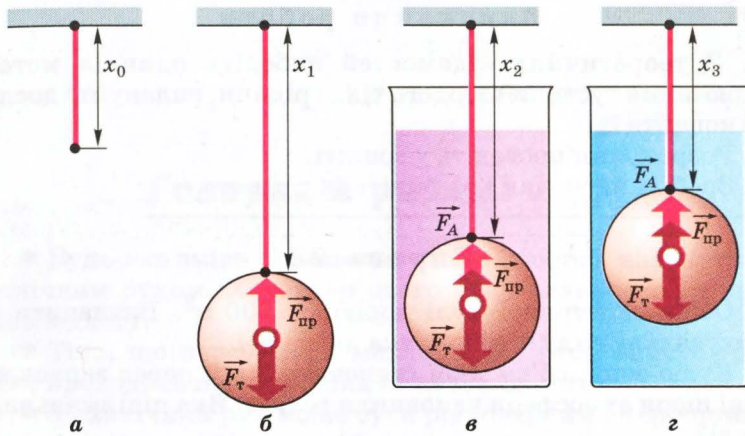
3. Густина невідомої рідини можна визначити за допомогою гумової нитки, тіла, яке тоне у воді та невідомій рідині, і лінійки. Послідовність дій при цьому показана на малюнку 122.

Маємо гумову нитку (чи пружинку), довжина якої без навантаження x_0 (мал. 122, а). Якщо до неї підвісити тіло у повітрі (мал. 122, б), то сила тяжіння F_T буде дорівнювати за значенням силі пружності $F_{пр}$, яка виникла в нитці.

Тіло перебуватиме у рівновазі.

Якщо тепер тіло опустити у воду (мал. 122, в), то на нього діятиме ще й архімедова сила:

$$F_T = F_A + F_{пр};$$



Мал. 122. Визначення густини рідини

$$\rho_T V_T g + \rho_B V_T g = k(x_2 - x_0).$$

Тепер тіло опущене у невідому рідину (мал. 122, г) з густиною ρ , яку потрібно визначити.

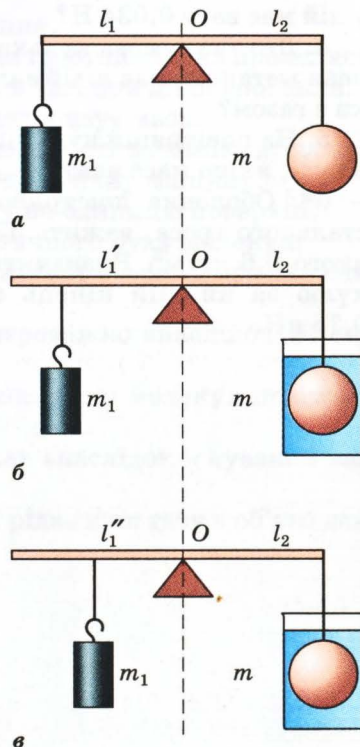
4. Для визначення густини твердого тіла чи невідомої рідини можна скористатися важелем. Для цього необхідно мати два тягарці, густину одного з яких масою m потрібно визначити, важіль, лінійку, склянки з водою і невідомою рідиною. Послідовність дій показана на малюнку 123.

Для визначення густини тіла маємо формулу

$$\rho_T = \rho_B \frac{l_1}{l_1 - l'_1}.$$

Для визначення густини невідомої рідини можна скористатися формулою

$$\rho = \rho_B \left(\frac{l_1}{l_1 - l'_1} - \frac{l_1}{l_1 - l'_1} \cdot \frac{l''_1}{l'_1} + \frac{l''_1}{l'_1} \right).$$



Мал. 123. Використання важеля для визначення густини

Виконання роботи

1. З теоретичних відомостей виберіть один із методів вимірювання густини твердого тіла і рідини, сплануйте досліди та виконайте їх.

2. Розрахунки проведіть у зошиті.

3. Зробіть висновки і запишіть їх у зошит.

Вправа 23

1. Об'єм повітряної кулі дорівнює 300 м^3 . Визначити виштовхувальну силу повітря, яка діє на неї.

2. Кулю-зонд, об'єм якої становить 8 м^3 , перед запуском у верхні шари атмосфери наповнили гелієм. Яка підймальна сила кулі?

3. Яка підймальна сила дитячої гумової кульки, наповненої воднем, об'єм якого в кульці 3 дм^3 , якщо кулька разом з воднем у ній має вагу $0,034 \text{ Н}$?

4. Дитяча гумова кулька, об'єм якої становить 4 дм^3 , наповнена метаном, має підймальну силу $0,009 \text{ Н}$. Яка вага оболонки з газом?

5. На повітряній кулі піднімають вантаж. Який об'єм гелію в кулі, якщо маса вантажу становить $1,8 \text{ т}$?

6*. Оболонка повітряної кулі, прив'язаної за допомогою сталюого троса, важить 550 Н і вміщує 350 м^3 газу, густина якого $0,6 \text{ кг/м}^3$. Визначити силу, достатню, щоб утримувати кулю за нижній кінець троса, якщо вага троса дорівнює $0,75 \text{ кН}$.

Головне в розділі 2

- Будь-яка зміна положення тіла в просторі називається механічним рухом. Характер цього руху визначається вибором тіла відліку.

- Тіло, що перебуває в механічному русі, описує траєкторію, проходить певний шлях і має швидкість.

- Механічний рух може бути рівномірним і нерівномірним, прямолінійним і криволінійним.

- Дія одного тіла на інше характеризується силою. Сила змінює швидкість тіла.

- Вага є проявом дії сили тяжіння.

- Для всіх фізичних тіл властива інертність, яка проявляється в поступовій зміні їх швидкості в часі при дії певної сили.

- Інертні властивості тіла характеризує маса.

- Для зміни сили застосовують прості механізми: важелі, блоки, похилу площину, гвинт, гідравлічну машину.

- Тиск визначає дію сили тиску на одиницю поверхні.

- Тиск у газі діє внаслідок хаотичного руху молекул.

- Тиск у рідинах і газах передається в усіх напрямках однаково.

- У рідині тиск створюється переважно внаслідок дії сили тяжіння.

- Атмосферний тиск є наслідком руху молекул повітря та дії на них сили тяжіння.

- Виштовхувальна сила виникає внаслідок існування вагового тиску в рідині чи газі.

- Сила Архімеда дорівнює вазі рідини чи газу в об'ємі даного тіла.



Розділ 3

РОБОТА Й ЕНЕРГІЯ. ПОТУЖНІСТЬ

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

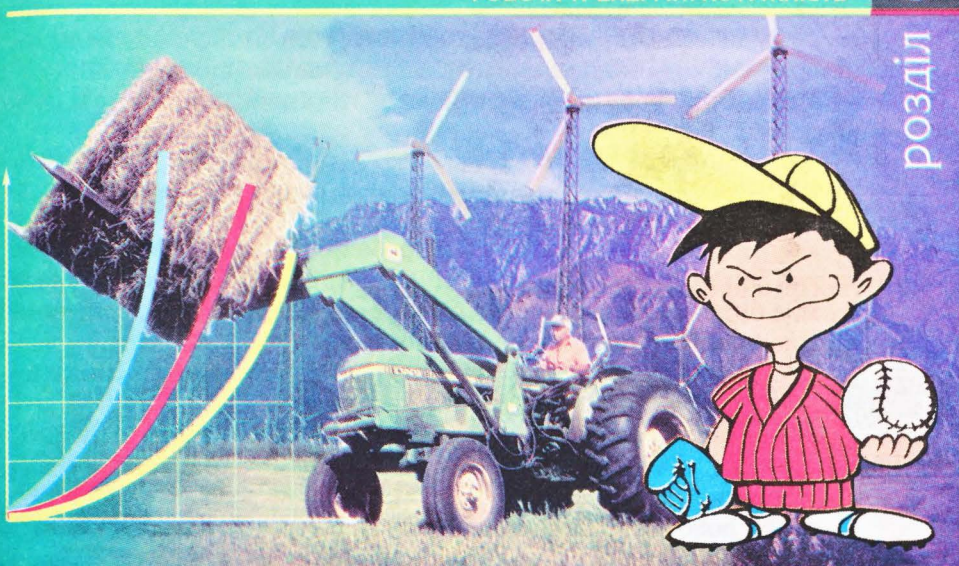
- які існують види механічної енергії, одиниці роботи, потужності;
- що таке прості механізми, використання машин і механізмів.

Ви зможете **пояснити**:

- закон збереження і перетворення енергії, «золоте правило» механіки;
- перетворення енергії в механічних процесах.

Ви будете **вміти**:

- спостерігати перетворення енергії в механічних процесах;
- вимірювати потужність і ККД механізмів;
- користуватися простими механізмами.



§ 41. Механічна робота

Слово робота ми чуємо дуже часто: і коли говоримо про дію яких-небудь машин чи механізмів, і коли описуємо які-небудь події повсякденного життя. Так, характеризуючи діяльність вантажника, який переносить мішки з борошном, ми кажемо, що він виконує роботу. Слово робота ми вживаємо й тоді, коли пояснюємо принцип дії двигуна внутрішнього згоряння, в якому гарячий газ, що утворився при згорянні паливно-повітряної суміші, переміщує поршні в циліндрах. В усіх наведених та подібних випадках слово робота застосовують тоді, коли тіла змінюють свій стан.

Що таке механічна робота

У фізиці використовують поняття механічної роботи. Вона виконується завжди, коли тіло здійснює переміщення під дією певної сили. Так, під дією сили тяжіння кулька падає на поверхню землі. Кажуть, що сила тяжіння виконує роботу з переміщення кульки.

Куля в стволі рушниці переміщується в результаті дії порохових газів, унаслідок чого летить на значну відстань.

Під дією сили пружності, яка виникає при розтягу тятиви лука, стріла набуває значної швидкості і відлітає від лука.

Але ніхто не скаже, що сила тяжіння, яка діє на нерухомий камінь, виконує роботу. Адже камінь не змінює свого стану.

Тому вважають, що робота виконується лише тоді, коли на тіло діє сила і воно при цьому здійснює переміщення.

Механічна робота є фізичною величиною, і її можна розрахувати.

Як розраховують механічну роботу

Уявімо собі, що на висоту 2 м треба підняти спочатку вантаж масою 5 кг, а потім – масою 10 кг. Очевидно, що в другому випадку має бути виконана робота більша, ніж у першому, оскільки до тіла потрібно прикласти більшу силу.

Більша робота буде виконана і в разі піднімання вантажу на більшу висоту, наприклад не на 2 м, а на 4 м.

Значення роботи залежить від значень сили і шляху, на якому діє сила. Ця залежність проста, і її можна записати у вигляді формули.

Якщо роботу позначити літерою A , силу – F , а шлях – l , то

$$A = Fl.$$

128

Одиниці роботи

Відповідно до означення встановлена і одиниця роботи. Якщо діюча сила дорівнює 1 Н і тіло зміщується на 1 м, то при цьому виконується робота 1 Дж (джоуль):

$$1 \text{ джоуль} = 1 \text{ ньютон} \cdot 1 \text{ метр},$$

або

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}.$$

Одиниця роботи названа на честь видатного фізика, дослідника в галузі механіки і теплоти Дж. Джоуля.



Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) – англійський фізик, один із відкривачів закону збереження енергії. Наукові праці присвячені електромагнетизму й теплоті.

Для зручності записів і розрахунків використовують такі кратні одиниці роботи, як кілоджоуль (кДж) та мегаджоуль (МДж):

$$1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж} = 10^3 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ МДж} = 1\,000\,000 \text{ Дж} = 10^6 \text{ Дж}.$$

Розглянемо приклад розрахунку виконаної роботи як фізичну задачу.

Задача. Робітник перевіз навантажений візок на відстань 25 м. Прикріплений до ручки динамометр показав прикладену силу 200 Н. Яку роботу виконав робітник?

Дано:

$$F = 200 \text{ Н},$$

$$l = 25 \text{ м}.$$

$A = ?$

Розв'язання

$$A = Fl,$$

$$A = 200 \text{ Н} \cdot 25 \text{ м} = 5000 \text{ Дж} = 5 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Робітник виконав роботу 5 кДж.

Користуючись означенням роботи і відповідною формулою, можна розрахувати величини, від яких залежить робота. Так, якщо відома робота і шлях, на якому ця робота виконана, можна визначити силу:

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

Аналогічно можна визначити шлях, на якому виконана робота:

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

129

1. Що таке механічна робота?
2. Від чого залежить значення роботи?
3. Як розрахувати роботу?
4. Які є одиниці роботи?



Вправа 24

1. Порівняти значення механічної роботи у таких випадках: а) тіло рівномірно піднімають на висоту 1 м; б) тіло ковзає кригою без тертя на відстань 1 м; в) тіло переміщують шорсткою горизонтальною поверхнею на відстань 1 м. Які сили при цьому виконують роботу?

2. Користуючись динамометром і лінійкою, визначити роботу, яка виконується при переміщенні книжки поверхнею стола.

3. Ящик вагою 80 Н підняли з підвалу завглибшки 2 м, а потім перетягли підлогою на відстань 2 м. У якому випадку була виконана більша робота?

4. Яку роботу потрібно виконати, щоб підняти тягарець вагою 10 Н на висоту 0,1 м?

5. Яка робота виконується, коли кран підіймає вантаж масою 10 т на висоту 30 м?

6*. Автомобіль масою 1,5 т рухається рівномірно горизонтальною поверхнею шляху завдовжки 200 м. Визначити роботу, яка виконується на цій ділянці шляху, якщо сила тертя становить 0,02 від ваги автомобіля.

7*. Учень, відпилюючи шматок дошки завдовжки 2,4 см, переміщує пилку за один раз на відстань 50 см, діючи силою 50 Н. Яка робота буде виконана, якщо з кожним рухом пилки в один бік вона заглиблюється в дошку на 2 мм?

8. *Експериментальне завдання.* Обчислити, яку роботу ви виконуете, підіймаючись сходами на висоту 12 м.

§ 42. «Золоте правило» механіки

Застосовуючи прості механізми, можна змінювати як силу, прикладену до тіла, так і шлях, від яких залежить значення роботи. Чи означає це, що за допомогою простих механізмів можна отримати виграш у роботі?

130

Чи дає виграш у роботі простий механізм

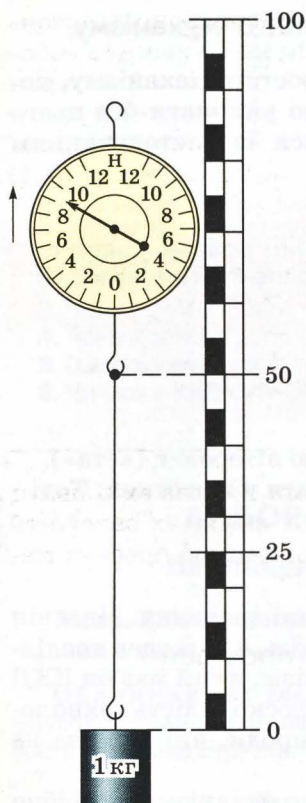
Закріпимо кінець нитки на гачку динамометра і підвісимо до неї тягарець масою 1 кг (мал. 124). Почнемо рівномірно його піднімати вгору. Динамометр покаже, що до нитки прикладена сила 9,8 Н. Підніmemo вантаж на висоту 0,25 м і розрахуємо роботу, яка буде при цьому виконана:

$$A = 9,8 \text{ Н} \cdot 0,25 \text{ м} = 2,45 \text{ Дж.}$$

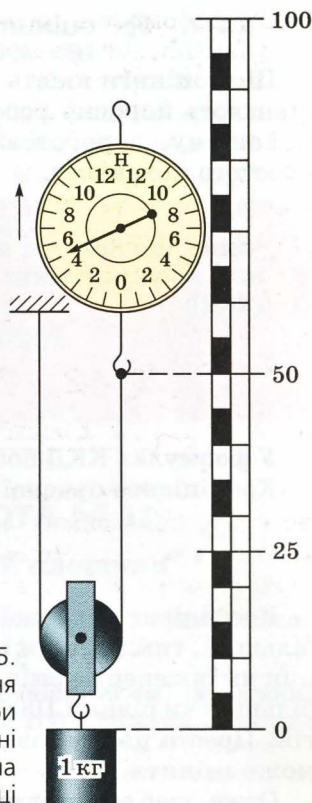
Кінець нитки закріпимо нерухомо в штативі і пропустимо її через рухомий блок, до якого підвішений вантаж масою 1 кг.

До вільного кінця нитки прикріпимо динамометр і відмітимо на лінійці положення точки приєднання динамометра (мал. 125). Рівномірно підніматимемо динамометр доти, доки вантаж також підійметься на висоту 0,25 м. Динамометр при цьому буде показувати силу 4,9 Н, але шлях, який пройшла точка приєднання динамометра, дорівнюватиме 0,5 м. А виконана робота в цьому випадку $A = 4,9 \text{ Н} \cdot 0,5 \text{ м} = 2,45 \text{ Дж}$.

Проаналізувавши результати експерименту, можна зробити висновок, що використавши рухомий блок, ми дістали виграш у силі в 2 рази, але програли у шляху, на якому діяла ця сила, також у 2 рази. Робота ж виявилася однаковою і в першому, і в другому випадках.



Мал. 124.
Вимірювання
роботи при
підніманні
вантажу



Мал. 125.
Вимірювання
роботи при
підніманні
вантажу на
рухомому блоці

Отже, піднімати вантаж із застосуванням рухомого блока значно легше, ніж без нього. Але шлях, на якому діятиме сила, буде відповідно більшим.

Жодного виграшу в роботі блок не дав. Подібне можна спостерігати і при використанні важеля або похилої площини. Така закономірність була помічена вченими ще в античні часи і виражена в «золотому правилі» механіки.

«Золоте правило» механіки

При застосуванні реальних простих механізмів на практиці виявляється, що їх застосування навіть дає деякий програш у роботі. Адже виконуючи роботу за допомогою простого механізму, треба ще й переміщувати блок чи важіль, які мають певну вагу, переборювати сили тертя тощо. Цю роботу не можна назвати корисною.

Жоден із простих механізмів не дає виграшу в роботі. Якщо виграємо в силі, то програємо в шляху.



Як оцінити якість простого механізму

Щоб оцінити якість того чи іншого простого механізму, порівнюють корисну роботу, яку необхідно виконати без цього механізму, з роботою, яка виконується із застосуванням простого механізму.



Число, що показує, яку частину від повної роботи $A_{\text{п}}$ становить корисна робота $A_{\text{к}}$, називають коефіцієнтом корисної дії (ККД):

$$\text{ККД} = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{п}}}.$$

У формулах ККД позначають грецькою літерою η («ета»). Коефіцієнт корисної дії зручно виражати у відсотках. Тоді

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{п}}} \cdot 100\%.$$

132

Коефіцієнт корисної дії може мати різні значення. Чим він більший, тим кращим вважається механізм. Але жоден дослідник чи інженер не зміг виготовити механізм, який мав би ККД більший чи рівний 100 %. І це не через недосконалість технологій. Просто цьому заважають закони природи, які людина не може змінити.

Отже, щоб оцінити якість того чи іншого механізму, потрібно порівняти повну роботу і корисну роботу.

Задача. За допомогою рухомого блока масою 2 кг на висоту 5 м підняли вантаж масою 20 кг. Який ККД пристрою?

Дано:

$$m_1 = 20 \text{ кг},$$

$$m_2 = 2 \text{ кг},$$

$$l = 5 \text{ м}.$$

η - ?

Розв'язання

За означенням $\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{п}}} \cdot 100\%.$

Корисна робота $A_{\text{к}} = F_1 s = m_1 g l;$

$$A_{\text{к}} = 20 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ м} = 980 \text{ Дж}.$$

Виконана робота:

$$A_{\text{п}} = \frac{F_1 + F_2}{2} \cdot 2l = g(m_1 + m_2) \cdot l;$$

$$A_{\text{п}} = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot (20 \text{ кг} + 2 \text{ кг}) \cdot 5 \text{ м} = 1078 \text{ Дж}.$$

$$\eta = \frac{980 \text{ Дж}}{1078 \text{ Дж}} \cdot 100\% = 91\%.$$

Відповідь. $\eta = 91\%$.

1. Чи можна отримати виграш у роботі, користуючись простими механізмами?
2. Чому важіль не дає виграшу в роботі?
3. Чому рухомий блок не дає виграшу в роботі?
4. Чому корисна робота завжди менша за повну?
5. Що показує коефіцієнт корисної дії?
6. Чи може ККД бути більшим за 100 %?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

Визначення ККД похилої площини

133

Мета. Вивчити властивості похилої площини в експериментальних умовах і визначити її ККД.

Обладнання: гладенька дошка завдовжки 50 см, дерев'яний брусок, динамометр, набір важків масою по 100 г кожний, штатив з лапкою, мірна стрічка.

Теоретичні відомості

У техніці, на виробництві і в повсякденному житті застосовують простий механізм, який має назву похилої площини. Це пристрій, у якому довга дошка чи рейка покладені так, що утворюють деякий кут із горизонтом. Як правило, цей кут менший за 45° .

Використання похилої площини дає змогу дістати виграш у силі. Виграш у роботі, як стверджує «золоте правило» механіки, отримати не можна. У реальних умовах той, хто користується похилою площиною, навіть програє в роботі, оскільки при переміщенні тіла похилою площиною виконує додаткову роботу з переборення сил тертя.

Виконання роботи

1. Кінець дошки закріпіть в лапці штатива так, щоб вона утворювала кут $15\ldots 20^\circ$ з горизонтом. Виміряйте довжину дошки і висоту закріпленого кінця дошки над поверхнею стола.
2. Виміряйте вагу дерев'яного бруска.
3. Навантаживши брусок важком масою 100 г, покладіть його на дошку.

4. До бруска приєднайте динамометр і почніть його тягти рівномірно вгору похилою площиною, стежачи за показами динамометра.

5. Повторіть дослід із бруском, навантаженим спочатку двома, а потім трьома важками.

6. Розрахуйте ККД похилої площини і виграш у силі для кожного з трьох дослідів.

7. Результати вимірювань і розрахунків запишіть у таблицю.

Таблиця

№	Вага бруска P_6 , Н	Маса важків m , кг	Вага важків P_v , Н	Вага бруска з важками P , Н	Висота похилої площини h , м	Корисна робота A_k , Дж	Сила тяги F , Н	Довжина похилої площини l , м	Повна робота A_p , Дж	ККД, %	Виграш у силі P/F
1											
2											
3											

8*. Збільшіть висоту закріпленого кінця дошки і повторіть дослід згідно з п. 1–6. Порівняйте значення ККД для обох випадків і зробіть висновки щодо залежності ККД і виграшу в силі від кута нахилу похилої площини.

Вправа 25

1. Вантаж масою 25 кг рівномірно піднімають за допомогою нерухомого блока, прикладаючи силу 270 Н. Визначити ККД блока.

2. Підіймаючи за допомогою нерухомого блока вантаж масою 5 кг на висоту 3 м, виконали роботу 160 Дж. Який ККД блока?

3. Який вантаж підіймають за допомогою нерухомого блока, якщо сила, прикладена до каната, дорівнює 420 Н, а ККД блока – 0,72 %?

4. Обчислити роботу, виконану під час піднімання вантажу масою 30 кг на висоту 12 м за допомогою нерухомого блока з $\text{ККД} = 90\%$.

5*. За допомогою одного рухомого і одного нерухомого блоків підняли рівномірно вантаж масою 80 кг на висоту 8 м. Яка сила була прикладена до вільного кінця каната і яка робота при цьому була виконана під час піднімання вантажу, якщо ККД пристрою становить 80 %?

6*. Вантаж масою 120 кг підняли на висоту 0,2 м за допомогою важеля. Відношення коротшого плеча важеля до довшого дорівнює 1: 6. Яку силу приклали до довшого плеча важеля і на яку відстань опустився його кінець, якщо $\text{ККД} = 80\%$?

7*. Щоб підняти вантаж масою 75 кг за допомогою важеля з відношенням плечей 2: 5, до довшого плеча приклали силу 400 Н. Визначити ККД важеля.

§ 43. Потенціальна енергія

135

У повсякденному житті можна знайти багато різних тіл, при переміщенні яких може виконуватися робота. Так, випущена з рук кулька почне падати під дією сили тяжіння, яка виконуватиме роботу з переміщення кульки.

Стиснута пружина може підняти на певну висоту тягарець. Тут сила пружності виконає роботу з переміщення тягарця.

Що таке енергія

Можна навести ще багато різних прикладів із природи, з повсякденного життя, з техніки, в яких ідеться про тіла, які знаходяться в такому стані, що за певних умов може виконатися робота при їх переміщенні. Про такі тіла кажуть, що вони мають енергію. За різних умов результат виконання роботи може бути різним. Тому й енергія може мати різні значення та бути розрахована.

Енергія – це фізична величина, що показує, яка робота може бути виконана при переміщенні тіла.



Одиниці енергії

Оскільки йдеться про можливість виконання роботи, то енергію доцільно вимірювати тими самими одиницями, що й роботу. Тому одиницею енергії є 1 Дж.

Види механічної енергії

У фізиці розрізняють два види механічної енергії: потенціальну і кінетичну. Якщо тіло нерухоме, але на нього діє певна сила, то кажуть, що воно має потенціальну енергію.

Потенціальну енергію має тіло, підняте над поверхнею Землі, стиснута пружина, стиснутий газ, річкова вода у водоймищі тощо.

Як розраховують потенціальну енергію

Розраховують потенціальну енергію з урахуванням природи сил, які діють на ці тіла. Найпростіше розрахувати потенціальну енергію тіла, піднятого над поверхнею Землі, оскільки сила, яка діє на нього, залишається практично сталою протягом усього часу його руху під дією цієї сили.

Нехай тіло масою m знаходиться на висоті h над землею. Якщо воно впаде на поверхню, то буде виконана робота

$$A = Fs = mgh.$$

Отже, про таке тіло можна сказати, що воно має потенціальну енергію

$$E_{\text{п}} = mgh.$$



Потенціальна енергія тіла, піднятого над поверхнею Землі, пропорційна масі тіла і його висоті над поверхнею Землі.

При розрахунках потенціальної енергії важливо пам'ятати, що висота h є шляхом, яке тіло пройде у вертикальному напрямі. Отже, завжди треба вказувати, відносно якої поверхні визначається потенціальна енергія. Наприклад, тіло масою 2 кг, підняте над столом на

висоту 1,5 м, матиме потенціальну енергію приблизно 30 Дж, а потенціальна енергія цього тіла, розрахована для висоти 3 м над підлогою, буде 60 Дж.



1. Які тіла мають потенціальну енергію?
2. Як обчислити потенціальну енергію тіла, піднятого над поверхнею Землі?
3. Коли потенціальна енергія одного й того самого тіла може мати різне значення?
4. Чи змінюється потенціальна енергія при падінні тіла?

Вправа 26

1. Яку енергію має цеглина, що лежить на стіні новобудови? *потенціальну*

2. Палю забивають пароповітряним молотом, маса ударної частини якого становить 1800 кг. Під час удару об верхній кінець палі виконується робота 27 кДж. На яку максимальну висоту піднімається перед цим ударна частина молота?

3. За допомогою копра металевий тягар масою 800 кг підняли на 6 м, а потім дали йому вільно впасти. Внаслідок удару металевого тягара об верхній кінець палі вона заглибилася в ґрунт на 30 см. Визначити силу опору ґрунту.

4. Яким молотком – легким чи важким – можна забити цвях за меншу кількість ударів? Чому? *важким*

§ 44. Кінетична енергія

Спостереження за явищами природи показують, що робота може виконуватися при русі тіл. Так, тепловоз, рухаючись колією, стикається з вагоном і зміщує його на деяку відстань. Виконується робота і в тому випадку, коли кинутий камінь пробиває кригу. Вистрілена з рушниці куля пробиває дошку тощо. Якщо потенціальну енергію мають тіла, на які діє сила, то в перелічених вище прикладах робота виконується тому, що вони здійснювали переміщення, рухалися.

137

Яку енергію мають рухомі тіла

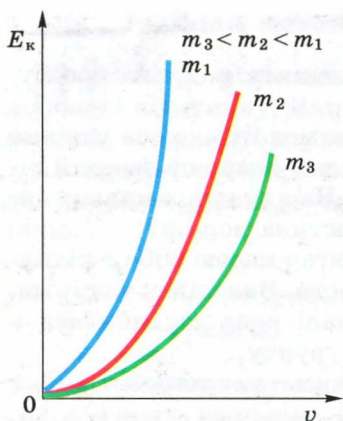
Кінетична енергія є фізичною величиною, і її значення можна розраховувати. Для цього треба знати, від яких фізичних величин вона залежить.

Енергію рухомого тіла називають кінетичною енергією.

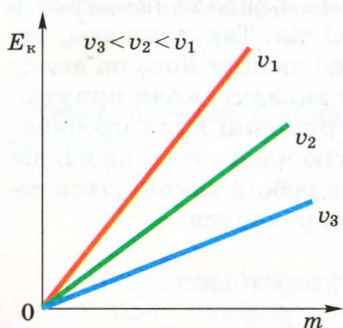
**Як розраховують кінетичну енергію**

Поставимо жолоб під деяким кутом до поверхні стола. На деякій відстані від його нижнього кінця покладемо брусок. На середній частині жолоба розмістимо маленьку сталю кульку і відпустимо її. Скотившись із жолоба, кулька вдариться об брусок і перемістить його на деяку відстань. Відмітимо відстань, на яку зміститься брусок.

Розмістимо кульку у верхній частині жолоба і відпустимо її. У цьому випадку, скотившись жолобом до основи, кулька набуває більшої швидкості, ніж раніше. Ударившись об брусок, вона



Мал. 126. Кінетична енергія тіла пропорційна квадрату його швидкості



Мал. 127. Кінетична енергія рухомого тіла пропорційна його масі

перемістить його на більшу відстань, ніж у попередньому досліді, виконавши відповідно більшу роботу.

Отже, кінетична енергія тіла залежить від його швидкості. Ця залежність нелінійна, що помітно на графіку залежності кінетичної енергії тіла від його швидкості, який має вигляд кривої лінії (мал. 126).

Кінетична енергія тіла відносна

Як відомо, швидкість тіла є відносною величиною, що залежить від вибору тіла відліку. Тому й кінетична енергія є величиною відносною. Якщо артилерійський снаряд, поціливши в стіну, наносить їй значних руйнувань, то снаряд, посланий услід надзвуковому літаку, не завдасть йому суттєвих ушкоджень, оскільки швидкість снаряда відносно літака буде невеликою.

Наслідки зіткнення автомобілів у випадку, коли вони рухаються назустріч один одному, будуть завжди більш відчутними, ніж тоді, коли один автомобіль наздоганяє другий.

Кінетична енергія залежить і від маси тіла. Якщо повторимо попередні досліди з кулькою більшої маси, то побачимо, що переміщення бруска в цьому випадку буде більшим. Ця залежність лінійна, тому можна сказати, що кінетична енергія тіла пропорційна його масі (мал. 127).

ка в цьому випадку буде більшим. Ця залежність лінійна, тому можна сказати, що кінетична енергія тіла пропорційна його масі (мал. 127).

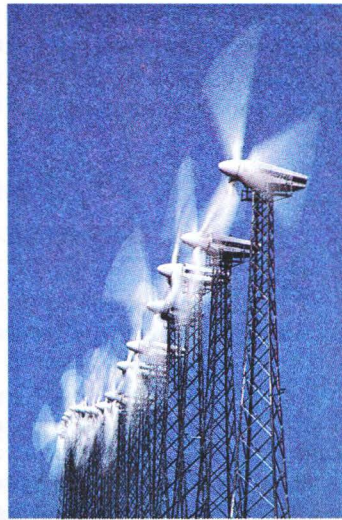
Як розрахувати кінетичну енергію

Щоб розрахувати кінетичну енергію, застосовують формулу:

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

де m – маса тіла; v – швидкість тіла.

Кінетичну енергію різних тіл використовують для виконання механічної роботи. Так, досвідчені водії автомобілів час від часу від'єднують двигун від коліс, вимикаючи зчеплення, і цим економлять паливо. Робота з подолання сил тертя виконується за рахунок кінетичної енергії автомобіля, який рухається з деякою швидкістю. Конструктори працюють над розробкою моделі міського автобуса, який рушає з місця за рахунок енергії розкрученого під час зупинки важкого маховика. Це дає можливість суттєво зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу та економити паливо.



Мал. 128. Кінетична енергія вітру використовується для виконання роботи

139

У південних областях України, зокрема на Кримському півострові, використовують вітрові електростанції, які працюють за рахунок кінетичної енергії рухомого повітря – вітру (мал. 128).

1. Чому рухоме тіло може виконати роботу?
2. Яку енергію називають кінетичною?
3. Як залежить кінетична енергія від швидкості тіла?
4. Як залежить кінетична енергія від маси тіла?



Вправа 27

обидва використовують кінетичну енергію, ні різні, бо їм замінити вітер нічого не вийде

1. Два автомобілі з вантажами однакової маси рухаються горизонтальним шляхом з однаковими швидкостями відносно поверхні Землі. Що можна сказати про їхні енергії? Чи однакові енергії вони матимуть, якщо один із них збільшить швидкість?

2. Чому спортсмен спочатку розбігається, а потім стрибає в довжину? *щоб набрати швидкість і відпружинити при стрибку*

3. Чому на дорогах легковим автомобілям дозволяється їхати з більшою швидкістю, ніж вантажним? *бо легкові легко керувати, а вантажники не можуть*

4. Два електропоїзди рухаються з однаковими відносно Землі швидкостями, але перший має шість, а другий – дев'ять таких самих вагонів. Який із них має більшу кінетичну енергію? *той який має більше вагонів*

5. Яку кінетичну енергію має куля масою 5 г, що вилетіла з рушниці зі швидкістю 500 м/с?

6. З якою швидкістю рухається автомобіль, якщо відомо, що його кінетична енергія дорівнює 50 кДж, а маса – 2,5 т?

7. Яка маса одного вагона, якщо кінетична енергія поїзда з 25 вагонів за швидкості 79,2 км/год становить 605 МДж?

§ 45. Закон збереження і перетворення енергії

Для обох видів механічної енергії є спільна властивість: при виконанні роботи енергія тіла завжди змінюється.

Як змінюється повна механічна енергія тіла

Піднятий над поверхнею Землі м'яч має певну потенціальну енергію. Але коли він падає, ця енергія зменшується. Проте в процесі падіння швидкість м'яча збільшується, тобто збільшується його кінетична енергія. Внаслідок виконання роботи силою тяжіння кінетична енергія м'яча збільшилася. Проте зменшилася потенціальна енергія. Отже, можна сказати, що кінетична і потенціальна енергії пов'язані одна з одною. Зі збільшенням кінетичної енергії зменшується потенціальна енергія, і навпаки. Кинутий вгору м'яч має спочатку велику швидкість і відповідно кінетичну енергію. При підніманні м'яча вгору збільшується його потенціальна енергія, але швидкість і кінетична енергія м'яча поступово зменшуються.

Отже, тіло одночасно може мати як кінетичну, так і потенціальну енергії.

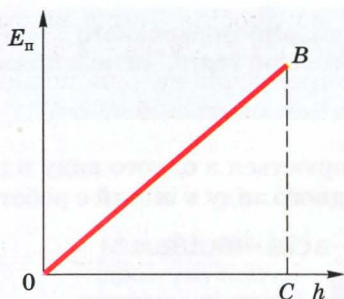


Суму кінетичної і потенціальної енергій тіла називають повною механічною енергією.

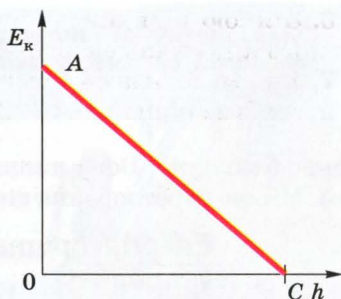
Який зв'язок між кінетичною і потенціальною енергією тіла

Мірою зміни кінетичної і потенціальної енергій є робота. При зміні потенціальної енергії тіла, що рухається вниз, виконується робота силою тяжіння. За рахунок цієї роботи відбувається збільшення кінетичної енергії. Якщо на дане тіло не діють сили тертя, то його повна механічна енергія залишається сталою. Це один із важливих законів природи, який потрібно враховувати при розрахунках параметрів руху тіл.

Зобразимо графічно залежність потенціальної і кінетичної енергій. Якщо потенціальна енергія пропорційна висоті, то гра-



Мал. 129. Потенціальна енергія пропорційна висоті



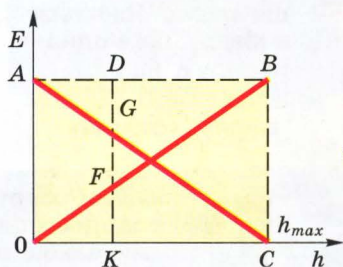
Мал. 130. Кінетична енергія кинутого вгору тіла зменшується з висотою

фіком буде пряма лінія (мал. 129). Кінетична енергія буде зменшуватися зі збільшенням висоти, тобто буде пропорційною висоті. Ця залежність виразиться також прямою лінією (мал. 130).

Сума кінетичної і потенціальної енергій

141

Накладемо обидва графіки один на одний і визначимо суму енергій для довільної висоти (мал. 131). Незавжди помітити, що сума енергій для довільної висоти тіла над поверхнею Землі буде однаковою. Це свідчить про те, що повна механічна енергія зберігається за умови відсутності сил тертя. У цьому суть закону збереження і перетворення механічної енергії. Те, що відсутні перетворення механічної енергії в інші види енергії, постулюють, вводячи поняття замкнутої системи. Усі перетворення механічної енергії відбуваються в межах цієї системи. Замкнуту систему в певному наближенні утворюють маятник і Земля. За відсутності сил тертя в цій системі відбуваються неперервні перетворення потенціальної і кінетичної енергій.



Мал. 131. Повна механічна енергія тіла залишається сталою

Як формулюється закон збереження і перетворення механічної енергії

З цього формулювання закону можна зробити деякі висновки. Зокрема, висновок про те, що механічна енергія не виникає і не



Сума кінетичної і потенціальної енергій ізольованого тіла в замкнутій системі, у якій відсутні сили тертя, залишається сталою.

зникає безслідно. Вона лише перетворюється з одного виду в інший. Мірою перетворення енергії з одного виду в інший є робота.

Енергія притаманна всім явищам у природі

Поняття енергії є універсальним. Воно стосується усіх природних процесів. Так, якщо брусок при ковзанні вниз похилою площиною зменшує свою швидкість аж до повної зупинки, то дошка похилої площини і сам брусок нагріваються. Розрахунки енергії, яка перетворилася в теплову, покажуть, що зміна механічної енергії бруска дорівнює тепловій енергії. Тому закон збереження і перетворення механічної енергії є окремим проявом більш загального закону природи – закону збереження і перетворення енергії.

142



Енергія ні з чого не виникає і не зникає безслідно. Вона лише перетворюється в рівній мірі з одного виду в інший.

Як формулюється закон збереження і перетворення енергії

Першовідкривачем цього закону, властивого для всіх процесів у природі, є англійський природодослідник Роберт Майєр.



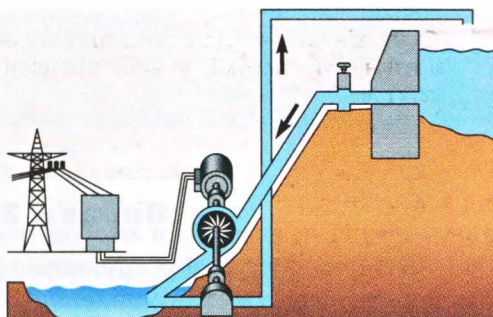
Юліус Роберт Майєр (1814–1878) – англійський природодослідник, першим відкрив фундаментальний закон збереження енергії при дослідженні життєдіяльності живих організмів у різних кліматичних умовах.



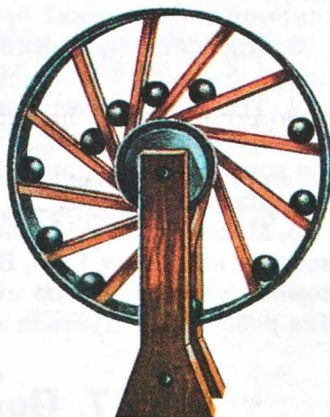
§ 46. Використання закону збереження і перетворення енергії

Закон збереження і перетворення енергії знайшов застосування в різних галузях техніки і виробництва. Так, біля багатьох гідроелектростанцій побудовані так звані гідроакumu-

Мал. 132. Схема гідроакумулюючої електричної станції



люючі станції (мал. 132). У період, коли споживання електроенергії мале, вода з основної водойми не зливається через греблю, а продовжує обертати лопаті турбін, з'єднаних з генераторами. Вироблений електричний струм приводить в дію електричні двигуни насосів, які закачують воду у водойми, розміщені вище від рівня основної. У період збільшеного споживання струму вода з цієї водойми обертає турбіни і виробляє додаткову енергію. Таким чином кінетична енергія падаючої води перетворюється в потенціальну енергію води в акумулюючій водоймі, яка потім знову перетворюється в кінетичну енергію падаючої води.



Мал. 133. Одна з моделей «вічного» двигуна

Відкриття закону збереження і перетворення енергії спричинило закриття цілого напрямку в науці, коли вчені намагалися створити пристрій, який виконував би роботу без споживання енергії ззовні (мал. 133). Такий двигун дістав назву вічного двигуна (perpetuum mobile). Закон збереження і перетворення енергії виявився настільки незаперечним, що Паризька академія наук, один із найавторитетніших наукових закладів світу, ще в 1755 р. постановила залишати без розгляду всі заяви і пропозиції, що стосуються вічного двигуна.

1. Які перетворення механічної енергії відбуваються при падінні тіла в безповітряному просторі?
2. Як відбувається перетворення потенціальної енергії в кінетичну?
3. Як підтвердити закон збереження механічної енергії тіла, що падає?





4. Яка фізична величина є мірою перетворення енергії?
5. Як формулюється закон збереження і перетворення механічної енергії?
6. Чому не можна побудувати вічний двигун?

Вправа 28

1. М'яч, підкинутий угору, через деякий час упав на землю. Які перетворення механічної енергії *зміна в тапсх Ер: Ек* при цьому відбулися? Чи відбувалися при цьому інші перетворення енергії?

2. Якими перетвореннями енергії супроводжується хід механічного годинника? *при швидкості руху Ек*

3. Під час скочування з гори санок їх швидкість збільшується. Чому? *бо збільшується Ек, і сили попереду під шматок*

4. Тіло масою 2 кг підняте над землею на висоту 10 м. Визначити потенціальну енергію цього тіла. Яку потенціальну енергію воно матиме на висоті 5 м при вільному падінні? Де поділася решта енергії тіла?

5. Молот копра для забивання паль має масу 600 кг. Він піднімається на висоту 12 м. Визначити кінетичну енергію молота в момент удару об палю після його вільного падіння без тертя. Яка робота виконується за один удар молота?

144

§ 47. Потужність

Механічна робота завжди пов'язана з рухом тіл. А рух відбувається в часі. Тому і виконання роботи, як перетворення механічної енергії, завжди відбувається протягом певного часу.

Робота виконується протягом певного часу

Найпростіші спостереження показують, що час виконання роботи може бути різним. Так, школяр може піднятися східцями на п'ятий поверх за 1–2 хв, а людина похилого віку – не менше як за 5 хв. Вантажний автомобіль КраЗ перевезе певний вантаж на відстань 50 км за 1 год. Але якщо цей вантаж частинами почне перевозити легковий автомобіль з причіпом, то затратить на це не менше 12 год.

Для опису процесу виконання роботи, з огляду на його швидкість, використовують фізичну величину, яка називається *потужністю*.

Що таке потужність

Потужність – це фізична величина, що показує швидкість виконання роботи і чисельно дорівнює відношенню роботи до часу, за який вона виконується.



Оскільки при виконанні роботи відбувається перетворення енергії, то можна вважати, що потужність характеризує швидкість перетворення енергії.

Як розрахувати потужність

Для обчислення потужності потрібно значення роботи поділити на час, протягом якого ця робота виконана:

$$\text{потужність} = \frac{\text{робота}}{\text{час}}.$$

Якщо потужність позначити латинською літерою N , то формула для розрахунку потужності матиме вигляд

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

145

Одиниці потужності

Для вимірювання потужності застосовується одиниця **ват (Вт)**. При потужності 1 Вт робота в 1 Дж виконується за 1 с:

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}}.$$

Одиниця потужності названа на честь англійського механіка Джеймса Уатта, який зробив значний внесок у теорію й практику побудови теплових двигунів.



Джеймс Уатт (1736–1819) – англійський фізик і винахідник.

Головна заслуга Уатта полягає в тому, що він відокремив водяний конденсатор від нагрівника та сконструював насос для охолодження конденсатора.

Фактично він збільшив різницю температур між нагрівником і конденсатором (холодильником), завдяки чому підвищив економічність парової машини. Пізніше теоретично це доведе Саді Карно.

Він один із перших висловив припущення, що вода це складна сполука, яка складається з водню і кисню.



Як і для інших фізичних величин, для одиниці потужності існують похідні одиниці:

$$1 \text{ мікват} = 1 \text{ мкВт} = 0,000001 \text{ Вт} = 10^{-6} \text{ Вт};$$

$$1 \text{ міліват} = 1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кіловат} = 1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ мегават} = 1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт} = 10^6 \text{ Вт}.$$

Задача 1. Яку потужність розвиває підймальний кран, якщо роботу 9 МДж він виконує за 5 хв?

Дано:

$$A = 9 \text{ МДж},$$

$$t = 5 \text{ хв}.$$

$N = ?$

Розв'язання

$$\text{За означенням } N = \frac{A}{t};$$

тому

$$N = \frac{9 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{300 \text{ с}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 30 \text{ кВт}.$$

Відповідь. Потужність крана 30 кВт.

Задача 2. Людина масою 60 кг піднімається на п'ятий поверх будинку за одну хвилину. Висота п'яти поверхів будинку 16 м. Яку потужність розвиває людина?

Дано:

$$m = 60 \text{ кг},$$

$$l = 16 \text{ м},$$

$$t = 1 \text{ хв} = 60 \text{ с}.$$

$N = ?$

Розв'язання

$$\text{За означенням } N = \frac{A}{t}.$$

$$\text{Робота визначається } A = Fl,$$

$$F = mg.$$

$$\text{Тоді } N = \frac{mgl}{t};$$

$$N = \frac{60 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 16 \text{ м}}{60 \text{ с}} = 160 \text{ Вт}.$$

Відповідь. Людина розвиває потужність 160 Вт.

Знаючи потужність і час, можна розрахувати роботу:

$$A = Nt.$$

Швидкість руху залежить від потужності

Потужність пов'язана зі швидкістю руху співвідношенням:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fl}{t} = Fv,$$

де F – сила, яка виконує роботу; v – швидкість руху.

Якщо відомі потужність двигуна і значення сил опору, то можна розрахувати можливу швидкість автомобіля чи іншої машини, яка виконує роботу:

$$v = \frac{N}{F}.$$

Отже, з двох автомобілів за рівних сил опору більшу швидкість матиме той, у якого потужність двигуна більша.

Кожен конструктор знає, що для збільшення швидкості руху автомобіля, літака чи морського судна потрібно, або збільшувати потужність двигуна, або зменшувати сили опору. Оскільки збільшення потужності пов'язане зі збільшенням витрат пального, то засобам сучасного транспорту, як правило, надають специфічної обтічної форми, за якої опір повітря буде найменшим, а всі рухомі частини виготовляють так, щоб сила тертя була мінімальною.

147

1. Чи завжди швидкість виконання роботи однакова?
2. Яку фізичну величину називають потужністю?
3. Як розрахувати потужність?
4. Яка основна одиниця потужності?
5. Які похідні одиниці потужності?
6. Чому потужність пов'язана зі швидкістю руху?
7. Наведіть приклади різної швидкості виконання роботи.
8. Як розрахувати роботу, знаючи потужність?



Вправа 29

1. Гиря годинника має масу 0,8 кг і за добу опускається на 120 см. Яка потужність такого механізму?
2. Кран піднімає рівномірно вантаж масою 5 т на висоту 10 м за 20 с. Яку потужність розвиває кран?
3. Якою має бути потужність насоса, який перекачує за добу 1800 л води з колодязя завглибшки 15 м?
4. Кран піднімає вантаж масою 3 т рівномірно зі швидкістю $30 \frac{\text{м}}{\text{хв}}$. Яку потужність розвиває двигун крана?

5. Трактор зі сталою потужністю 100 кВт розвиває тягове зусилля 50 кН, 30 кН, 20 кН. Як при цьому змінюється швидкість трактора?

6*. Який шлях пройде автомобіль, рухаючись рівномірно протягом 1 год, розвиваючи силу тяги 900 Н і потужність 30 кВт?

7. Чому навантажений автомобіль з тією самою потужністю двигуна рухається повільніше, ніж ненавантажений?

8. *Експериментальне завдання.* Визначити максимальну потужність, яку ви розвиваєте, щоб піднятися на третій поверх свого будинку або школи.

9*. Тепловоз потужністю 3000 кВт тягне поїзд, прикладаючи силу 150 кН. Який час потрібний, щоб рівномірно пройти шлях 48 км?

10*. За 3 год рівномірного руху електровоз проходить відстань 216 км. Визначити потужність електровоза, якщо він розвиває силу тяги 200 кН.

11*. Підіймач потужністю 2 кВт піднімає вантаж із середньою швидкістю $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ на висоту 5 м. Яка при цьому виконується робота?

12. За який час підіймач потужністю 10 кВт піднімає вантаж масою 2000 кг на висоту 20 м, якщо вантаж переміщується рівномірно?

Головне в розділі 3

- Існують два види механічної енергії: кінетична і потенціальна.

- Якщо тіло переміщується або деформується під дією сили, то виконується механічна робота.

- До простих механізмів відносять важелі, блоки.

- Жоден простий механізм не дає виграшу в роботі.

- Якість механізму визначається коефіцієнтом корисної дії, який визначає частину корисної роботи в загальній виконаній роботі.

- Тіло, при переміщенні якого може бути виконана робота, має енергію.

- Взаємодіючі тіла мають потенціальну енергію.

- Рухоме тіло має кінетичну енергію, яка залежить від швидкості і маси тіла.

- Потенціальна і кінетична енергії можуть взаємно перетворюватися. Такі перетворення відбуваються в рівній мірі, якщо відсутні сили тертя.

- Суму кінетичної і потенціальної енергій називають повною енергією системи.

- У замкнутій системі за відсутності сил тертя сума кінетичної і потенціальної енергій залишається сталою.

- Закон збереження і перетворення енергії підтверджує неможливість існування вічного двигуна (*perpetuum mobile*).

- Потужність характеризує швидкість перетворення одного виду енергії в інший.

Розділ 4



ТЕПЛОВІ ЯВИЩА. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОВІ МАШИНИ

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

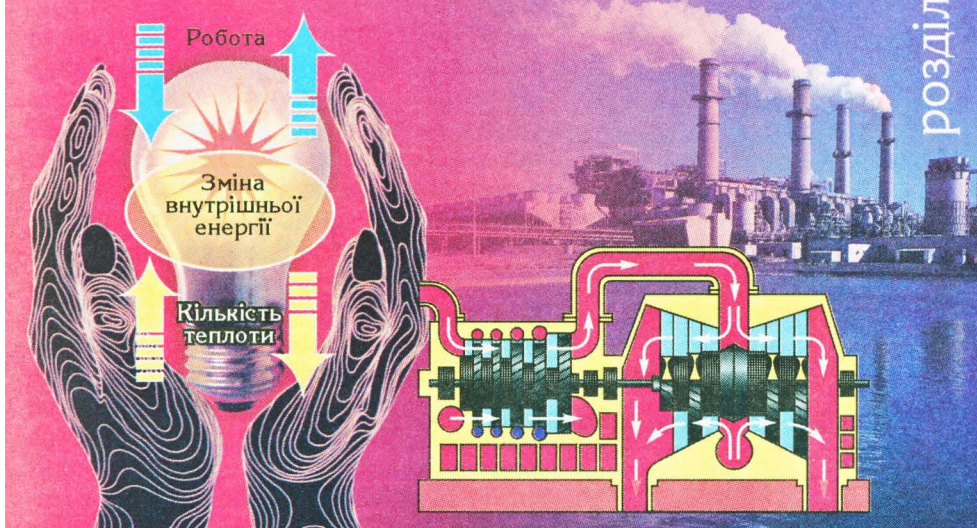
- способи вимірювання температури тіл;
- фізичні величини, що характеризують теплові процеси;
- природу теплообміну і види передачі теплоти.

Ви зможете **пояснити**:

- зміни агрегатного стану речовини на основі атомно-молекулярного вчення про будову речовини;
- перебіг таких теплових процесів, як плавлення і кристалізація твердих тіл, випаровування і конденсація рідин, кипіння;
- перетворення енергії під час цих теплових процесів;
- принцип дії теплових машин і двигунів, їхній вплив на навколишнє середовище.

Ви будете **вміти**:

- обчислювати кількість теплоти для різних теплових процесів;
- вимірювати фізичні величини, що характеризують теплові процеси;
- розв'язувати задачі, застосовуючи формули кількості теплоти й умови перебігу теплових явищ.



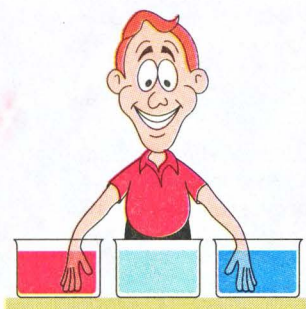
§ 48. Тепловий стан тіл. Теплообмін

Упродовж життя ми часто спостерігаємо явища і процеси, пов'язані з передаванням теплоти, обміном тепловою енергією. Вони відбуваються по-різному: завдяки безпосередньому контакту більш нагрітих тіл з менш нагрітими, внаслідок змішування рідких та газоподібних тіл, отримання теплової енергії під час згоряння палива тощо. З багатовікового досвіду пізнання світу людство усвідомило закономірності перебігу теплових явищ і процесів, узагальнивши їх у вигляді понять, законів, теорій теплоти.

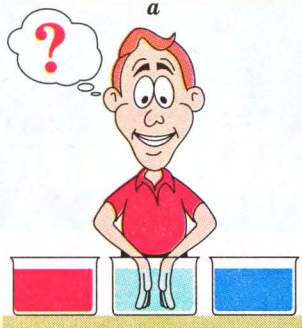
Нагрітий предмет, занурений у воду, з часом охолоне, а вода нагріється; лід, принесений знадвору в теплу кімнату, розтане; сонячне проміння нагріває поверхню Землі, завдяки чому зберігається земне життя тощо.

Для визначення теплового стану тіл людина спочатку послуговувалася своїми відчуттями, вживаючи такі слова, як холодне, тепле, гаряче. Наприклад, ми кажемо холодний лід, гарячий пісок, тепла вода тощо. Проте оцінити його таким чином можна лише приблизно і не завжди однозначно. На підтвердження цього виконаємо такий дослід.

Зануримо на кілька хвилин одну руку в гарячу воду, іншу – в холодну (мал. 134, а). Після цього зануримо обидві руки



а



б

Мал. 134. Відчуття
людиною теплового стану
тіла

в посудину з водою кімнатної температури (мал. 134, б) і спробуємо за своїми відчуттями встановити, яка в ній вода – холодна чи гаряча? На диво, ми це не зможемо зробити, оскільки рука, яка була в теплій воді, відчуватиме холод, і навпаки, рука, яка була в холодній воді, відчуватиме тепло. Отже, маємо протиріччя, адже насправді температура води в цій посудині однакова.

Таким чином, ми пересвідчилися, що за власним відчуттям людина не завжди може однозначно визначити тепловий стан тіла. Для цього їй треба знайти кількісну міру – фізичну величину, за якою можна об'єктивно встановити, яке з тіл і на скільки тепліше чи холодніше за інше. Тому для характеристики теплового стану тіла використовують поняття температури.

У природі плин теплових процесів відбувається за законами, які пов'язані з теплообміном. Тіла з вищою температурою віддають теплоту менш нагрітим, остигаючи при цьому; менш

нагріті тіла отримують теплоту, і їх температура підвищується. Під час такого теплообміну температури тіл із часом вирівнюються. За звичайних умов не може бути, щоб під час теплообміну теплота самочинно переходила від тіла, що має нижчу температуру, до тіла, температура якого вища.

Справді, наш життєвий досвід підтверджує цей висновок. Коли ми кладемо в холодильник пакет із молоком, його температура знижується до температури холодильної камери. Між тим внаслідок теплообміну температура всередині холодильника трохи підвищиться, і тому він увімкнеться для приведення температури камери до початкової.

Таким чином, перебіг теплових явищ і процесів під час теплообміну завжди відбувається в напрямі вирівнювання температур. З часом між тілами встановлюється тепла рівновага, і їхні температури стають однаковими. У тіл з однаковими температурами теплообмін не відбувається.



Температура тіла визначає його тепловий стан: чим вона вища, тим більший ступінь «нагрітості» тіла.

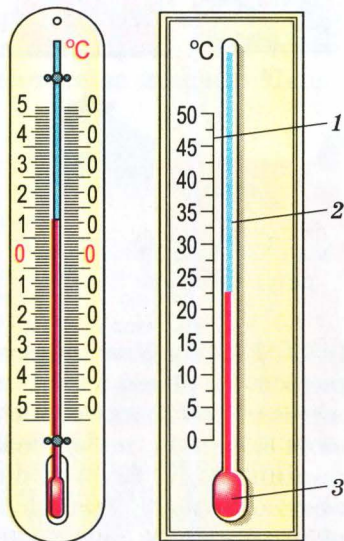
1. Наведіть приклади нагрівання чи охолодження тіл і вкажіть, яким із способів це відбувається.
2. Поясніть теплові процеси, що відбуваються після відімкнення електричної плитки від електромережі.
3. У воді, температура якої становить $+2^{\circ}\text{C}$, плаває лід, температура якого -5°C . Які теплообмінні процеси відбуваються при цьому? Чи може лід віддавати теплоту воді, в якій він плаває? Чи відбуватиметься теплообмін, якщо їхня температура дорівнюватиме 0°C ?
4. Чи можуть у природі відбуватися теплові процеси, коли менш нагріті тіла віддають теплоту більш нагрітим?



§ 49. Температура тіл. Вимірювання температури тіла

Тепловий стан тіла характеризується його температурою. Щоб її визначити, треба встановити спосіб вимірювання даної фізичної величини і знайти мірило, за допомогою якого вона може бути визначена кількісно. З різних причин ми не можемо цього зробити так само, як під час вимірювання довжини чи маси тіла, тобто порівняти властивість з еталоном. Тому температуру тіла вимірюють в інший спосіб.

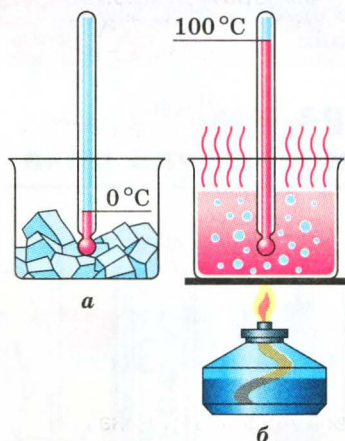
У 1742 р. шведський учений А. Цельсій запропонував визначати температуру на основі властивості тіл розширюватися під час їх нагрівання. Він виготовив прилад, названий термометром, який складався з маленької колбочки-резервуара 3, заповненої рідиною (спиртом або ртуттю), тонкої капілярної трубочки 2 і шкали 1 (мал. 135). Цельсій запропонував температурну шкалу, в якій «0» відповідав температурі плавлення льоду, а температурі кипіння води надавалося значення «100»¹.



Мал. 135. Будова термометра

¹ Насправді він побудував зворотну шкалу, нуль якої відповідав температурі кипіння води, а 100 – температурі танення льоду. Проте згодом для зручності ці точки поміняли місцями.

Принцип дії такого рідинного термометра ґрунтується на тому, що внаслідок контакту колбочки з тілом, температуру якого треба виміряти, між ними встановлюється теплова рівновага і температура колбочки дорівнює температурі тіла. Рідина в колбочці внаслідок зміни температури або розширюється при нагріванні, або зменшує об'єм при охолодженні. Оскільки ця зміна об'єму незначна, щоб її можна було зафіксувати, до колбочки приєднано тонку трубочку. Завдяки їй можна візуально спостерігати навіть незначні зміни об'єму рідини в колбочці, тому що діаметр трубочки дуже малий.



Мал. 136. Побудова температурної шкали Цельсія

Для того щоб кількісно визначити температуру тіла, необхідно встановити розмір одиниці температури і проградуювати температурну шкалу. Відтворимо це на досліді, який показує хід міркування А. Цельсія в побудові температурної шкали, названої його ім'ям.

Помістимо термометр спочатку в посудину з льодом, який тоне (мал. 136, а). Через деякий час, після встановлення теплової рівноваги, відмітимо рівень рідини в капілярній трубочці позначкою «0». Після цього перенесемо термометр у посудину з водою, що кипить (мал. 136, б). Унаслідок нагрівання рідина в колбочці розшириться, а її рівень в капілярній трубочці підніматиметься і зупиниться в точці, яку позначимо «100». Таким чином ми зафіксували значення, що відповідають температурам танення льоду і кипіння води. Відомо, що за певних умов (нормального атмосферного тиску, який дорівнює 760 мм рт. ст. або 101 293 Па) ці температури легко відтворити, оскільки вони мають сталі значення.

Якщо тепер поділити інтервал між цими позначками на 100 рівних частин, то отримаємо температурну шкалу, яку запропонував А. Цельсій. Одиниця температури за цією шкалою називається градусом Цельсія (позначається °C).

У побуті ми, як правило, користуємося температурною шкалою Цельсія, оскільки вона зручніша для вимірювання температури в межах значень, звичних для життєдіяльності людини (погодні умови,



Температури танення льоду і кипіння води називають реперними точками шкали Цельсія.

температура людського тіла тощо). Разом з тим у фізиці частіше застосовують абсолютну шкалу температур, запропоновану англійським ученим В. Томсоном, лордом Кельвіном. Нуль цієї шкали відповідає такому тепловому стану тіла, коли припиняється тепловий рух атомів і молекул. Це відбувається за температури $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цю температуру називають абсолютним нулем температури.

Міжнародною системою одиниць основною одиницею температури визнано одиницю цієї шкали кельвін (позначається K). За розміром кельвін однаковий з градусом Цельсія: $1\text{ }K = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переведення температури з однієї шкали в іншу здійснюють за формулою: $T = t + 273$. Наприклад, кімнатна температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за абсолютною шкалою дорівнює $293\text{ }K$. Зазначимо, що в переважній більшості вимірювань використовують міжнародно визнану одиницю температури – кельвін. Проте коли треба підкреслити, що температура визначається за шкалою Цельсія, вживають позначення $^{\circ}\text{C}$.

Температуру за абсолютною шкалою температур позначають літерою T , а за шкалою Цельсія – t .



1. Чому під час вимірювання температури власного тіла людина повинна тримати термометр кілька хвилин?
2. Відомий англійський учений І. Ньютон запропонував прототип термометра, однією з реперних точок якого була температура тіла здорової людини. Запропонуйте власну конструкцію медичного термометра і спосіб градування температурної шкали, побудованих на значеннях температури здорової і хворої людини.
3. Коли ми знімаємо покази термометра, то визначаємо температуру тіла чи температуру самого термометра?
4. Як відомо, при вимірюванні температури змінюється не лише об'єм рідини, а й скляної колбочки, в якій вона міститься. Чи впливає це на покази термометра і як? Що треба зробити, щоб цей вплив мінімізувати?

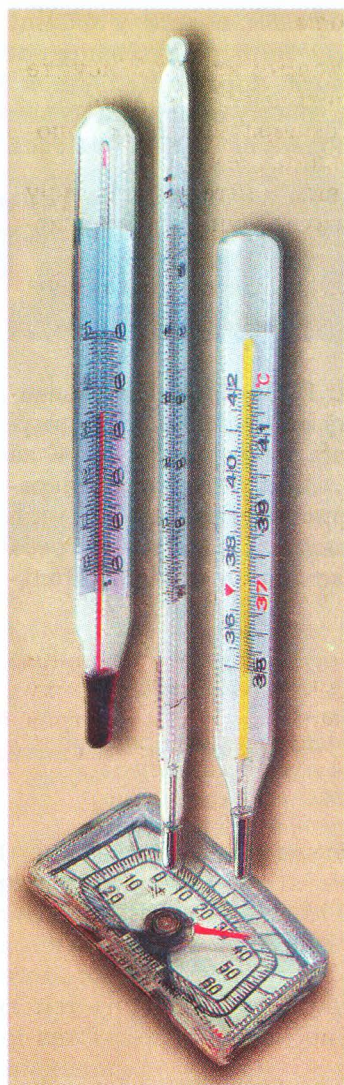


ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

Вимірювання температури за допомогою різних термометрів

Мета. Оволодіти навичками вимірювання температури тіл за допомогою різних термометрів.

Обладнання: різні види термометрів (мал. 137), хімічна склянка або калориметр, колба з теплою водою.



Мал. 137. Різні види термометрів

Вказівки до роботи

Конструктивно всі термометри складаються з вимірювального елемента і температурної шкали. В основу дії вимірювального елемента покладено певну його властивість, що залежить від температури. Наприклад, для рідинних термометрів – це залежність об'єму рідини від температури; для електричних термометрів – залежність сили струму від температури.

Найпоширенішими залишаються рідинні термометри. Проте останнім часом їх починають витісняти електричні термометри, які точніші й мають ширший діапазон вимірювання температур. Існують також інші прилади для вимірювання температури. Наприклад, у металургії температуру розплавленого металу визначають за його кольором.

Вимірювання температури тіла вимагає дотримання певних правил.

1. Насамперед необхідно забезпечити належний контакт термометра з тілом, температуру якого вимірюють, щоб між ними відбувався повноцінний теплообмін.

2. Контактувати з тілом повинен лише вимірювальний елемент, наприклад колбочка з термометричною рідиною. Не варто намагатися повністю занурити термометр у досліджуване тіло.

3. Треба витримати певний час, щоб завершився теплообмін між тілом і термометром, їхні температури зрівнялися.

4. Необхідно пам'ятати, що термометри – дуже ламкі вимірювальні прилади і вимагають обережного поводження з ними. Одразу по завершенню вимірювання їх треба класти у футляр або такі місця, які забезпечать надійне їх зберігання.

Виконання роботи

1. Ознайомтеся з будовою різних термометрів. З'ясуйте особливості їх застосування при вимірюванні температури.

2. Визначте діапазон вимірювання температури за їх допомогою, ціну поділки та одиниці вимірювання температури.

3. За допомогою різних термометрів виміряйте температуру одного й того самого тіла, порівняйте результати і зробіть висновки.

4. Визначте похибку вимірювання для кожного термометра і з'ясуйте, який із них найточніший.

§ 50. Внутрішня енергія тіла. Два способи зміни внутрішньої енергії

Досі тепловий стан тіл ми пов'язували з температурою і не з'ясовували, яку властивість характеризує ця фізична величина, від чого вона залежить і що визначає.

Як відомо, атомно-молекулярне вчення про будову речовини дає нам загальне уявлення про залежність хаотичного руху атомів і молекул від температури тіла: чим вища температура тіла, тим більша швидкість руху мікрочастинок, з яких воно складається.

Тепловий рух – це хаотичний (безладний) рух атомів, молекул та інших мікрочастинок, з яких складається тіло, швидкість яких залежить від його температури.



Таким чином, пов'язуючи швидкість руху атомів і молекул з температурою, ми можемо сказати, що цей рух визначає тепловий стан тіла, тобто хаотичний рух мікрочастинок тіла є тепловим рухом.

Атоми і молекули постійно перебувають у русі, тому вони мають кінетичну енергію. Внаслідок зіткнень між собою молекули мають різні швидкості, тому треба мати на увазі їхню середню кінетичну енергію, яка й визначає температуру тіла. Цей висновок, зроблений у XIX ст. Дж. Максвеллом, покладено в основу сучасної молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

Інше припущення, висловлене видатним німецьким фізиком Л. Больцманом, про потенціальну енергію взаємодії атомів і молекул доповнює попередній висновок. Адже, згідно з атомно-молекулярним ученням, мікрочастинок також взаємодіють



Наявність внутрішньої енергії в усіх тіл зумовлена тепловим рухом і взаємодією атомів і молекул, з яких вони складаються.

між собою. У газах – це короточасні зіткнення. У рідинах і твердих тілах – тривала взаємодія, завдяки якій атоми, молекули або іони перебувають у відносно стабільних положеннях.

Обидва припущення, зроблені Дж. Максвеллом і Л. Больцманом,

дають підстави стверджувати, що кожне тіло має внутрішню енергію, яка складається з кінетичної енергії теплового руху атомів і молекул та потенціальної енергії їхньої взаємодії.

Перебіг теплових явищ і процесів відбувається, як правило, таким чином, що це позначається на зміні внутрішньої енергії тіл. Так, якщо нагрівати якийсь предмет, то середня кінетична енергія його молекул зростає, оскільки підвищується температура тіла. Отже, зростає і внутрішня енергія тіла.

Проте ми знаємо, що змінити температуру тіла можна не лише внаслідок передавання теплоти, а й завдяки виконанню механічної роботи. Наприклад, якщо молотком кілька разів ударити по металевій пластині, то вона нагріється. Розглянемо докладніше способи зміни внутрішньої енергії тіла.



Теплопередача може відбуватися з наданням кількості теплоти або відбиранням її.

Одним з найпоширеніших теплових процесів є передавання енергії від одних тіл іншим унаслідок теплообміну, коли більш нагріті тіла віддають теплоту менш нагрітим. Цей процес називається *теплопередачею*. Кількісно його характеризує

фізична величина, що називається *кількістю теплоти* (позначається Q).

Як і енергія, кількість теплоти вимірюється у джоулях (Дж). Для теплових процесів це досить мала одиниця. Наприклад, для нагрівання 1 г води на 1 К треба затратити 4,19 Дж теплоти. Тому для зручності використовують кратні одиниці кількості теплоти – кілоджоуль (кДж) і мегаджоуль (МДж):

$$1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж} = 10^3 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ МДж} = 1\,000\,000 \text{ Дж} = 10^6 \text{ Дж}.$$

Раніше для вимірювання кількості теплоти використовували одиницю, яка називається *калорія* (від лат. calor – *тепло*). 1 калорія дорівнює кількості теплоти, яку треба надати 1 г води для нагрівання на 1 К. Зараз цю одиницю частіше використовують для визначення енергетичної цінності харчових продуктів (її можна прочитати на упаковках багатьох продуктів).

$$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ ккал} \approx 4200 \text{ Дж}.$$

У процесі теплопередачі відбувається підвищення чи зниження температури тіла або змінюється агрегатний стан речовини (плавлення твердих тіл, випаровування рідин тощо). Наприклад, поміщена в морозильну камеру холодильника вода поступово охолоджуватиметься, віддаючи частину своєї теплової енергії камері; через певний час при досягненні $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода перетвориться на лід. Тобто внаслідок теплообміну вода втратила певну частину внутрішньої енергії, тому її температура знизилася і змінився агрегатний стан. Кількісно зміна внутрішньої енергії в результаті теплопередачі дорівнює кількості теплоти, яка передана тілу чи віддана ним: $\Delta U = Q$.

Інший спосіб зміни внутрішньої енергії пов'язаний із виконанням роботи. На підтвердження його виконаємо дослід. Наллємо в колбу міксеру воду і виміряємо її температуру. Увімкнемо тепер міксер на кілька хвилин і знову виміряємо температуру води після його зупинки. Отримані результати свідчать, що вона підвищилася. Це можна пояснити лише тим, що внаслідок виконання міксером роботи (інших процесів не відбувалося) збільшилася середня кінетична енергія молекул води. Очевидно, що в даному випадку зміна внутрішньої енергії дорівнює роботі, виконаній над тілом: $\Delta U = A$.

Численні дослідні факти і досвід показують, що існує лише два способи зміни внутрішньої енергії тіла – теплопередача і виконання роботи (мал. 138). Якщо ці два процеси здійснюються одночасно, то зміна внутрішньої енергії тіла дорівнюватиме сумі виконаної над тілом роботи і кількості переданої теплоти: $\Delta U = A + Q$.

Таким чином, можна зробити висновок, що всі без винятку тіла мають внутрішню енергію, яка складається з кінетичної енергії теплового руху атомів і молекул та потенціальної енергії їх взаємодії. Внутрішня енергія тіла може змінитися в результаті двох процесів – теплопередачі або виконання роботи.



Мал. 138. Два способи зміни внутрішньої енергії тіла

1. Якими двома способами можна змінити внутрішню енергію тіла? Наведіть приклади для кожного з них.





2. За наведеними прикладами виконання роботи поясніть перетворення енергії, що при цьому відбуваються.
3. Поясніть теплообмінні процеси, що відбуваються під час танення льоду і нагрівання води.
4. Нагрітий на сонці камінець кинути у воду. Як відбуватиметься теплопередача? Коли вона припиниться?
5. Молоток нагрівається, якщо ним забивати цвяхи або помістити у вогонь. Чи можна встановити, яким із способів змінено його внутрішню енергію, якщо сам процес не спостерігати?

§ 51. Види теплопередачі

Ми встановили, що теплота передається від більш нагрітих до менш нагрітих тіл, але не з'ясували, як це відбувається. Чи однаково це протікає у твердих тілах, рідинах і газах? Яка природа передавання теплоти? Щоб відповісти на ці запитання, проведемо досліди.

160

Візьмемо залізний цвях і скляну паличку і почнемо нагрівати їхні кінці у полум'ї газового пальника (мал. 139). Через деякий час ми відчуємо тепло. До пальців воно швидше дійде у залізному цвяхі, і згодом ми не зможемо його тримати в руках, оскільки температура того кінця, за який ми тримали, значно підвищиться. Скляну ж паличку ми ще довго зможемо тримати, хоча з часом і її температура також підвищиться до такого значення, коли пектиме пальці.



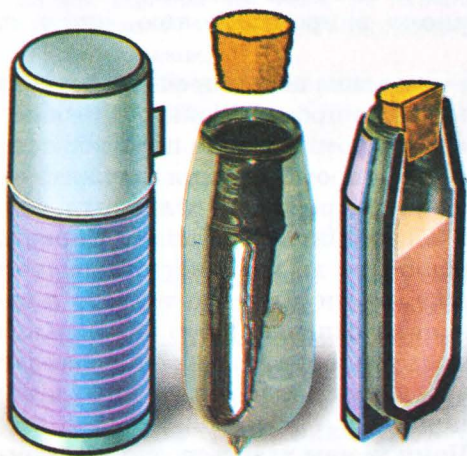
Мал. 139. Нагрівання залізного цвяха і скляної палички в полум'ї

Розглянемо механізм передавання теплоти в даному випадку. Як відомо, підвищення температури свідчить про збільшення середньої кінетичної енергії мікрочастинок тіла, з яких воно складається. У полум'ї молекули повітря мають значно вищу енергію, ніж молекули не нагрітих скляної палички і залізного цвяха. Внаслідок зіткнення вони передають їм частину своєї енергії, завдяки чому температура кінців палички і цвяха поступово підвищується. Мікрочастинок нагрітих кінців палички і цвяха, які мають вищу кінетичну енергію, частково віддають її сусіднім атомам і молекулам, а ті далі.

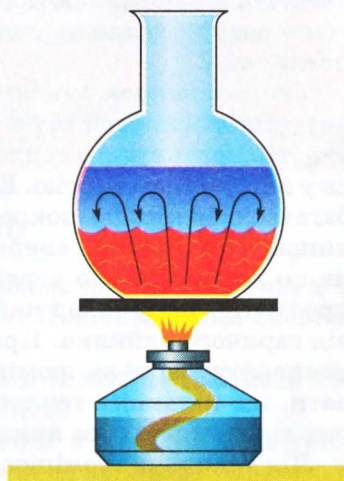
Таке передавання енергії внаслідок взаємодії частинок здійснюється ніби ланцюжком, шар за шаром, і з часом темпе-

ратура всіх частин тіла вирівнюється. Оскільки атоми і молекули тіл не переміщуються від одного кінця до іншого, перенесення речовини при цьому не відбувається. Такий вид теплопередачі від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, який спричиняє вирівнювання температур без перенесення речовини, називається *теплопровідністю*.

На досліді ми переконалися, що теплопровідність речовин неоднакова. Вона більша у металів, серед яких найкращими провідниками теплоти є мідь і срібло. Значно гірше проводять теплоту деревина, цегла, тканини, папір тощо. Існують речовини, які погано проводять теплоту: азбест, полістирол, вата тощо. Їх використовують для теплоізоляції, наприклад для утеплення приміщень. Найгіршими провідниками теплоти є гази, особливо розріджені. Цю їхню властивість використовують, зокрема, у термосах, для збереження температури сталою тривалий час (мал. 140).



Мал. 140. Будова термоса



Мал. 141. Конвекція в рідинах

Крім теплопровідності, існує інший вид теплопередачі, який супроводжується перенесенням речовини. Він називається *конвекцією* і притаманний рідинам і газам.

Для спостереження конвекції в рідині наллємо в колбу воду і почнемо її нагрівати (мал. 141). Щоб краще бачити переміщення потоків рідини, вкинемо у воду дві-три зернини перманганату калію (у побуті – марганцівки). Ми помітимо, що нижні шари води піднімаються вгору, а верхні опускаються вниз. Це пояснюється тим, що нижні нагріті шари води, густина яких менша, витісняються вгору важчими холодними шарами,

густина яких більша. Оскільки має місце різниця густин, виникає виштовхувальна сила, яка спричиняє змішування холодних і теплих шарів води. Перенесення речовини конвекційними потоками відбувається доти, доки існує різниця температур.

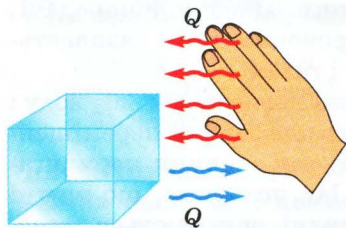
Конвекція зумовлює багато природних явищ і процесів. Наприклад, завдяки їй здійснюється обігрівання кімнати від системи опалення: потоки теплого повітря від обігрівача (радіатора) піднімаються вгору, а холодне повітря заміщує його, нагрівається від радіатора і знову витісняється холодним повітрям. Така циркуляція холодного і теплого повітря вирівнює температуру в різних куточках кімнати і забезпечує її обігрівання.

Крім теплопровідності й конвекції, завдяки яким відбувається теплопередача в речовині (з перенесенням її або без нього), існує особливий вид теплообміну, зумовлений випромінюванням, подібним до світлового. Його інколи називають променевим теплообміном. Тіла не лише випромінюють теплову енергію, а й поглинають її. Так, Земля підтримує життєздатну температуру завдяки сонячному випромінюванню, яке вона поглинає.

Теплове випромінювання зумовлене перетворенням частини внутрішньої енергії тіл в енергію випромінювання; і навпаки, енергія поглинутого теплового випромінювання перетворюється у внутрішню енергію. Енергія випромінювання залежить від багатьох факторів, зокрема від температури тіла: чим вона вища, тим більша енергія випромінювання тіла. Справді, якщо долоні рук по черзі підносити до холодного і нагрітого предметів, наприклад чайника, то ми відчуємо теплоту лише від гарячого чайника. Проте це не означає, що тіла з низькою температурою не випромінюють теплову енергію: слід враховувати, що кількість теплоти, яку вони віддають, менша, ніж у тих тіл, температура яких вища.

Лід також випромінює. Чому ж нам здається, що від нього «дме холодом» (мал. 142). Це відчуття виникає тому, що рука отримує менше теплової енергії, ніж сама випромінює. Порушується баланс між отриманою кількістю теплоти і тією, яку рука віддає. Тому ми відчуваємо холод від льоду.

Теплове випромінювання, крім температури тіла, залежить також від кольору його поверхні та її стану: шорсткі й чорні поверхні випромінюють і поглинають теплоту краще, ніж гладенькі й блискучі. Тому, наприклад, рефрижератори



Мал. 142. Відчуття холоду від льоду

(автомобільні або залізничні холодильні камери) фарбують у сріблястий або білий колір.

Таким чином, за механізмом теплообміну розрізняють три види теплопередачі:

- *теплопровідність*, яка зумовлена взаємодією атомів і молекул речовини і відбувається без перенесення речовини;
- *конвекція*, яка притаманна рідинам і газам внаслідок перемішування нагрітих і холодних потоків речовини;
- *теплове випромінювання*, яке властиве всім тілам завдяки перетворенню частини внутрішньої енергії в енергію випромінювання або, навпаки, перетворенню енергії поглинутого випромінювання у внутрішню енергію.

1. Які види теплопередачі існують у природі?
2. У чому полягає суть теплопровідності? Поясніть її механізм.
3. Чи правильний із фізичної точки зору вислів, що шуба гріє?
4. Чим відрізняється механізм теплопровідності від конвекції?
Чи може у твердих тілах теплопередача здійснюватися шляхом конвекції?
5. Як пояснити утворення морського бризу?
6. Завдяки якому з видів теплопередачі ми відчуваємо теплоту вогнища?



Вправа 30

1. Якщо закорковану пробірку з водою нагрівати в полум'ї, через деякий час корок «вистрілить». Поясніть зміни енергії, що відбулися під час цього досліду.

2. У спеку жителі пустель одягають «теплі» (ватяний або хутряний) одяг. Чим це можна пояснити?

3. Каскадери, які виконують трюки з вогнем, змащують своє тіло вазеліном. З якою метою вони це роблять?

4. Чому в сильний мороз металеві предмети здаються нам на дотик холоднішими, ніж дерев'яні?

5. Чому сковороду роблять з металу, а ручку до неї – з деревини або пластмаси?

6. Чому влітку ми вдягаємось у світлий одяг?

7. Чому в сучасних вікнах ставлять склопакети – подвійне скло, з об'єму між поверхнями якого «відкачано» повітря?

§ 52. Кількість теплоти.

Питома теплоємність речовини

Численні факти свідчать, що одним із наслідків теплопередачі є зміна температури тіла. Справді, якщо підігрівати воду в чайнику на плиті, то її температура весь час підвищуватиметься, аж доки вода не закипить. Так само, щоб обробити якусь деталь, коваль розжарює її на вогні. Її температура підвищується завдяки передачі певної кількості теплоти, і чим більше вона її отримає (наприклад, довше нагріватимемо), тим вищою буде температура деталі. Отже, під час теплопередачі зміна температури тіла Δt залежить від кількості наданої теплоти Q ; і навпаки, кількість теплоти Q , отримана тілом, прямо пропорційна зміні температури: $Q \sim \Delta t$.

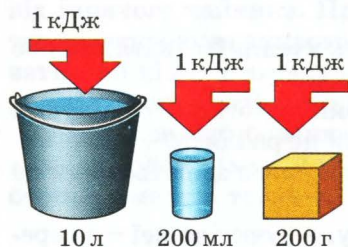
З курсу математики відомо, щоб записати рівність, треба встановити коефіцієнт пропорційності:

$$Q = C \Delta t.$$

164

Коефіцієнт пропорційності C називають *теплоємністю тіла*. Він показує, яку кількість теплоти треба надати (забрати) даному тілу, щоб збільшити (зменшити) його температуру на 1 K. Вимірюється теплоємність у джоулях на кельвін $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)$.

Теплоємність тіла 500 $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ означає, що для підвищення його температури на 1 K тілу треба надати 500 Дж теплоти.



Мал. 143. Надання 1 кДж теплоти різним тілам

Можна перекоонатися, що теплоємність тіла залежить від його маси, а також роду речовини, з якої воно виготовлене (мал. 143). Для цього передамо тілам різної маси, наприклад відру води ($m = 10 \text{ кг}$) і склянці води ($m = 200 \text{ г}$), однакову кількість теплоти 1000 Дж (з цією метою достатньо влити в них близько 2 г окропу). Очевидно, що температура відра води практично не зміниться, а температура води в склянці підвищиться приблизно на 1 K.

Якщо тепер 1000 Дж теплоти передати тілам однакової маси (наприклад, $m = 200 \text{ г}$), але виготовленим з різних речовин, то помітимо, що результат також буде неодна-



Чим більша маса тіла, тим більшу кількість теплоти треба йому надати, щоб змінити температуру на 1 K.

ковий. Так, температура залізного предмета підвищиться на 10 K , свинцевого – на 36 K , а олії – лише на 3 K .

Таким чином, кількість теплоти, надана тілу внаслідок теплопередачі, залежить від його маси, роду речовини і різниці температур у кінцевому і початковому станах:

$$Q = cm(t - t_0) = cm\Delta t.$$

Якщо порівняти цю формулу кількості теплоти з попередньою, то можна помітити, що існує величина $c = \frac{Q}{m\Delta t}$, яка характеризує теплоємність речовини і не залежить від маси тіла. Цю фізичну величину називають *питомою теплоємністю речовини*. Вона визначає кількість теплоти, яку треба надати 1 кг речовини, щоб підвищити температуру тіла на 1 K :

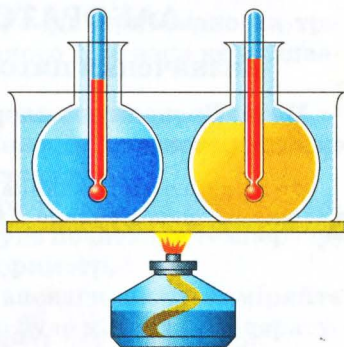
$$c = \frac{Q}{m\Delta t}.$$

З формули можна встановити, що питома теплоємність речовини вимірюється в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Кожна речовина має певне значення питомої теплоємності (у таблиці на форзаці наведено відповідні значення). Це означає, що різні речовини потребують різної кількості теплоти для зміни температури на 1 K . Підтвердимо це на досліді.

Візьмемо дві колби і наллємо в них воду й олію однакової маси. Для того щоб теплопередача відбувалася за однакових умов, помістимо їх у кювету з водою, що нагрівається від пальника (мал. 144). Тепер будемо спостерігати за зміною температури води й олії. Ми помітимо, що температура олії зростає швидше, ніж води. Це означає, що для зміни температури олії на 1 K потрібна менша кількість теплоти, ніж для води.

Таким чином, фізична суть питомої теплоємності речовини полягає в тому, що ця фізична величина характеризує вплив теплопередачі на тепловий стан тіла. Числове значення питомої теплоємності речовини визначає, на скільки зміниться внутрішня енергія тіла масою 1 кг при теплопередачі зі зміною його температури на 1 K . Наприклад, значення питомої теплоємності алюмінію $900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ означає, що підвищення температури 1 кг алюмінію на 1 K спричинить зростання його внутрішньої енергії на 900 Дж .



Мал. 144. Нагрівання води й олії



1. Який фізичний зміст теплоємності тіла й питомої теплоємності речовини? Чим вони відрізняються?
2. Яке співвідношення між кілоджоулем і мегаджоулем?
3. Що означає вислів «теплоємність тіла дорівнює $200 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ »?
4. Що означає вислів «питома теплоємність речовини дорівнює $2500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ »?
5. Тілам однакової маси, одне з яких виготовлене з алюмінію, а друге – з деревини, надано однакоvu кількість теплоти. У якого з тіл температура зміниться більше?
6. У чому полягає суть калориметричного методу вимірювання кількості теплоти?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

Визначення питомої теплоємності речовини

166

Мета. Визначити калориметричним методом питому теплоємність речовини.

Обладнання: склянка з водою, калориметр, термометр, терези з важками, досліджуване тіло (важок), посудина з гарячою водою.

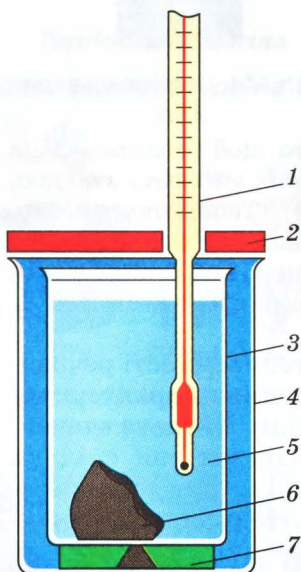
Вказівки до роботи

Для дослідження теплообмінних процесів застосовують прилади, які називаються калориметрами (від лат. calor – *тепло* і грец. metreo – *вимірюю*). Найпростіший калориметр складається з тонкостінного циліндра 3, зовнішньої посудини 4, теплоізоляційної підставки 7, кришки 2 і термометра 1 (мал. 145).

Такий пристрій дає змогу максимально зменшити втрати теплоти назовні, які важко врахувати у вимірюваннях. Він є основним засобом у калориметричному методі вимірювання. У його основу покладається рівність кількості теплоти $Q_{\text{т}}$, яку досліджуване тіло віддає, і кількості теплоти $Q_{\text{к}}$, яку отримує калориметр і вода:

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{к}}.$$

Основною характеристикою калориметра з водою є його теплоємність C , яку визначають заздалегідь. Наближено



Мал. 145. Будова калориметра

це можна зробити за допомогою обчислень, якщо відомі маса води m_v , маса тонкостінного циліндра $m_{\text{ц}}$ і матеріал, з якого він виготовлений: $C = c_v m_v + c_{\text{ц}} m_{\text{ц}}$, де c_v – питома теплоємність води, $c_{\text{ц}}$ – питома теплоємність матеріалу циліндра. Якщо вважати, що питома теплоємність циліндра і його маса будуть набагато меншими за масу і питому теплоємність води, то другим доданком можна знехтувати, оскільки він несуттєво впливатиме на результат. За таких умов кількість теплоти, що віддає тіло внаслідок теплопередачі, дорівнює кількості теплоти, яку отримує вода в калориметрі. Для того щоб її обчислити, слід виміряти зміну температури води:

$$Q_k = C \Delta t = c_v m_v \Delta t.$$

Виконання роботи

1. Налийте в калориметр холодної води приблизно на три чверті (щоб при зануренні досліджуваного тіла вона не вилилася) і визначте її масу m_1 .

2. Визначте початкову температуру води в калориметрі t_1 .

3. Виміряйте за допомогою важільних терезів масу тіла m_2 , питому теплоємність якого ви будете визначати.

4. Занурте досліджуване тіло в гарячу воду на кілька хвилин, виміряйте її температуру t_2 (це буде початкова температура тіла), а потім перенесіть тіло в калориметр.

5. Після встановлення теплової рівноваги знову виміряйте температуру води в калориметрі t_3 (це буде кінцева температура тіла).

6. Дані дослідів занесіть до таблиці.

7. Обчисліть кількість теплоти Q_1 , яку отримала вода в калориметрі: $Q_1 = c_1 m_1 (t_3 - t_1)$.

8. Обчисліть тепер питому теплоємність досліджуваного тіла c_2 , узявши до уваги, що кількість теплоти, яку віддало тіло Q_2 , дорівнює кількості теплоти Q_1 , яку отримав калориметр:

$$c_2 = \frac{Q_1}{m_2 (t_2 - t_3)}.$$

9. За отриманим значенням питомої теплоємності за допомогою таблиці визначте, з якої речовини виготовлене досліджуване тіло.

§ 53. Тепловий баланс

На практиці досить часто виникає потреба у знаходженні значень фізичних величин, що характеризують теплообмінні процеси після встановлення теплової рівноваги.

Наприклад, визначити температуру суміші внаслідок змішування гарячої й холодної води або обчислити кількість теплоти, отриманої тілом під час теплопередачі, чи знайти температуру тіла, яку воно матиме.



Для розрахунку теплових процесів потрібно скласти рівняння відносно кількості теплоти, яку втрачають та набувають усі тіла, що перебувають в теплообмінному процесі.

В усіх цих випадках треба складати рівняння, що містять невідомі величини, і шукати їхній розв'язок відносно значень невідомих величин. Під час розрахунку теплообмінних процесів застосовують певні правила, що дають змогу встановити умови перебігу теплових явищ та процесів і знайти шукану величину. Сформулюємо їх.

Перше. Усі тіла, що перебувають тривалий час у теплообміні, досягають стану теплової рівноваги і їхні температури вирівнюються. На підставі цього можна стверджувати: якщо температура тіла A дорівнює температурі тіла B , а температура тіла B , у свою чергу, дорівнює температурі тіла C , то тіла A і C також мають однакові температури.

Якщо $t_A = t_B$ і $t_B = t_C$, то $t_A = t_C$.

Друге. Слід враховувати, що за законом збереження енергії, який справджується для всіх природних явищ і процесів, теплота не може безслідно зникнути або виникнути з нічого. У зв'язку з цим кажуть про умову теплового балансу: у замкнутій системі під час теплопередачі одні тіла віддають таку кількість теплоти, яку отримують інші тіла.

$$Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots$$

Третє. У фізиці прийнято вважати кількість теплоти додатною, якщо тіло отримує теплову енергію, і від'ємною, якщо воно віддає її. На підставі цього правила записують рівняння теплового балансу: сума кількості теплоти, яку отримали тіла, дорівнює сумі кількості теплоти, яку віддали інші тіла внаслідок теплопередачі.

Ці три правила визначають певну послідовність дій під час розв'язування фізичних задач на розрахунок теплообмінних процесів.

Крок 1. З'ясувати, які тіла беруть участь у теплообміні.

Крок 2. Встановити, якої температури досягають тіла в стані теплової рівноваги. Якщо за умовою задачі вона не задана, позначити її літерою t .

Крок 3. З'ясувати, які з тіл віддають теплоту, а які отримують її. Записати формулу кількості теплоти для кожного з тіл, що перебувають в теплообмінному процесі (при цьому слід завжди від більшого значення температури віднімати менше).

Крок 4. Скласти рівняння теплового балансу, в лівій частині якого записати суму кількостей теплоти, яку отримали тіла внаслідок теплопередачі, у правій частині – суму кількостей теплоти, що віддали тіла під час теплообміну.

Крок 5. Розв'язати рівняння відносно шуканої величини і знайти її значення.

Наведемо приклади розв'язування задач на розрахунок теплообмінних процесів.

Задача 1. Якою стане температура води, якщо змішати 100 г окропу і 100 г води, температура якої дорівнює 20 °С?

Дано:

$$m_1 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

$$m_2 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

$$t_1 = 100 \text{ °С},$$

$$t_2 = 20 \text{ °С},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$t - ?$$

Розв'язання

За умовою теплового балансу кількість теплоти Q_1 , яку віддає окріп, остигаючи до температури t , дорівнює кількості теплоти Q_2 , яку отримує холодна вода, нагріваючись до цієї самої температури t , тобто $Q_1 = Q_2$.

$$Q_1 = cm_1(t_1 - t); Q_2 = cm_2(t - t_2).$$

$$cm_1(t_1 - t) = cm_2(t - t_2).$$

$$\text{Звідси } 100 \text{ °С} - t = t - 20 \text{ °С};$$

$$2t = 120 \text{ °С}, t = 60 \text{ °С}.$$

Відповідь. Температура води стане 60 °С.

Задача 2. В алюмінієвій посудині, маса якої дорівнює 1,5 кг, міститься 800 г води кімнатної температури (20 °С). Скільки окропу треба долити в посудину, щоб отримати воду з температурою 45 °С?

Дано:

$$t_1 = 100 \text{ °С},$$

$$c_1 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$m_2 = 800 \text{ г} = 0,8 \text{ кг},$$

$$t_2 = t_3 = 20 \text{ °С},$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$m_3 = 1,5 \text{ кг},$$

$$t = 45 \text{ °С},$$

Розв'язання

У теплообміні беруть участь алюмінієва посудина, окріп і холодна вода. За умовою теплового балансу кількість теплоти Q_1 , яку віддає окріп, остигаючи до 45 °С, дорівнює кількості теплоти, яку отримує холодна вода Q_2 і посудина Q_3 , нагріваючись до тієї самої температури 45 °С: $Q_1 = Q_2 + Q_3$.

$$Q_1 = c_1 m_1(t_1 - t); Q_2 = c_2 m_2(t - t_2);$$

$$c_3 = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$m_1 = ?$

$$Q_3 = c_3 m_3 (t - t_3).$$

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2) + c_3 m_3 (t - t_3).$$

$$4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot m_1 (100^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) =$$

$$= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,8 \text{ кг} \cdot (45^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) +$$

$$+ 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1,5 \text{ кг} \cdot (45^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}).$$

$$\text{Звідси } 231\,000 \cdot m_1 = 117\,750 \text{ кг};$$

$$m_1 \approx 0,51 \text{ кг}.$$

Відповідь. Треба долити 0,51 кг окропу.

Задача 3. Алюмінієвий калориметр, маса якого дорівнює 100 г, містить 100 г води кімнатної температури. У калориметр поклали тіло масою 150 г, температура якого становить 80°C . Через деякий час, після встановлення теплової рівноваги, температура в калориметрі дорівнювала 27°C . Визначити питому теплоємність тіла, яке поклали в калориметр.

Дано:

$$m_1 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

$$c_1 = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$m_2 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

$$t_1 = t_2 = 20^\circ\text{C},$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$m_3 = 150 \text{ г} = 0,15 \text{ кг},$$

$$t_3 = 80^\circ\text{C},$$

$$t = 27^\circ\text{C}.$$

$c_3 = ?$

Розв'язання

Унаслідок теплообміну між калориметром, водою і тілом температура в калориметрі підвищилася від 20 до 27°C . За умовою теплового балансу, кількість теплоти Q_3 , яку віддало тіло, дорівнює сумі кількостей теплоти, яку отримали вода в калориметрі Q_2 і сам калориметр Q_1 , тобто: $Q_3 = Q_1 + Q_2$.

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1); Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2);$$

$$Q_3 = c_3 m_3 (t_3 - t).$$

$$c_3 m_3 (t_3 - t) = c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2).$$

$$c_3 \cdot 7,95 \text{ кг} \cdot \text{К} = 3570 \text{ Дж};$$

$$c_3 = 450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Відповідь. Питома теплоємність тіла дорівнює $450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, тобто воно виготовлене із заліза.

1. Доведіть математично, що кількість теплоти буде від'ємною, якщо тіло віддає теплоту.
2. На якій підставі ґрунтується умова теплового балансу?
3. Чи може хоч одне тіло, що перебуває в стані теплової рівноваги з іншими тілами, мати іншу температуру, ніж у них?
4. Сформулюйте правило, за яким складається рівняння теплового балансу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

Порівняння кількості теплоти при змішуванні води різної температури

Мета. Дослідним шляхом переконатися, чи справджується рівняння теплового балансу під час змішування води різної температури.

Обладнання: калориметр, термометр, мірний циліндр чи мензурка, склянка, посудини з водою.

171

Теоретичні відомості

Як відомо, рівняння теплового балансу передбачає врахування у теплообмінному процесі всіх тіл, що взаємодіють. Проте на практиці це вдається зробити не завжди, оскільки можливі втрати теплоти в навколишнє середовище або інші процеси, тепловий ефект яких важко врахувати. Через це, досліджуючи теплообмінні процеси, зокрема під час змішування води різної температури, важливо якомога зменшити такі втрати теплоти, тоді й результат буде надійнішим, і дослід більш досконалим.

Для цього найчастіше використовують калориметр, у якого подвійні стінки, і тому теплопровідність мала порівняно з іншими тілами. Це зменшує обмін теплотою між калориметром і навколишнім середовищем, що дає змогу спростити рівняння, оскільки можна знехтувати одним із доданків. Крім того, виконувати дослід слід чітко, не гаючи часу на підготовчу роботу. Головне – це зафіксувати стан теплової рівноваги, про що свідчать сталі покази термометра.

Оскільки в шкільних умовах важко забезпечити високу точність вимірювань калориметричним методом, обчислення краще робити з двома значущими цифрами.

Виконання роботи

1. За допомогою мірного циліндра чи мензурки відміряйте в склянку приблизно 100 мл холодної води і виміряйте її температуру (бажано мати воду кімнатної температури).

2. Налийте в калориметр приблизно стільки само гарячої води і виміряйте її температуру.

3. Обережно влийте зі склянки в калориметр холодну воду і після встановлення теплової рівноваги виміряйте температуру суміші.

4. Результати вимірювань запишіть у таблицю.

Маса холодної води m_1 , г	Початкова температура холодної во- ди t_1 , °C	Масса гарячої води m_2 , г	Початкова температура гарячої води t_2 , °C	Температура суміші t , °C

5. Обчисліть кількість теплоти Q_1 , яку отримала холодна вода:

$$Q_1 = cm_1(t - t_1).$$

6. Обчисліть кількість теплоти Q_2 , яку віддала гаряча вода:

$$Q_2 = cm_2(t_2 - t).$$

7. Порівняйте одержані значення і зробіть висновок.

Вправа 31

1. Яка теплоємність алюмінієвого калориметра, якщо його маса 150 г?

2. Унаслідок охолодження гасу на 30 °C виділилося 25,2 кДж теплоти. Якою була маса гасу?

3. Для нагрівання металевої деталі масою 10 кг від 20 до 120 °C потрібна така сама кількість теплоти, яка виділяється під час охолодження 1 кг води на 90 °C. З якого металу виготовлена деталь?

4. Стальному бруску, об'єм якого дорівнює 300 см³, передано 117 кДж теплоти. На скільки змінилася температура бруска?

5. У залізну каструлю масою 1,5 кг наливо 2,5 кг води за температури 20 °C. Яку кількість теплоти треба надати каструлі з водою, щоб вода закипіла?

6. У залізний казан масою 10 кг наливо 20 кг води за температури 10 °C. Яку кількість теплоти треба надати казану з водою, щоб вона закипіла?

7. У каструлі змішали 0,8 кг води за температури 25 °C і 0,2 кг окропу. Якою стала температура суміші? Яку кількість теплоти віддав окріп? Яку кількість теплоти отримала вода?

8. У калориметр, в якому було 100 г води за температури 20 °C, налили гарячу воду з температурою 80 °C. Через деякий

час у калориметрі встановилася температура $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скільки гарячої води долили в калориметр?

9. У калориметр, в якому міститься 200 г води за температури $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, поклали мідний брусок масою 50 г , температура якого становить $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити температуру, яка встановилася в калориметрі.

§ 54. Теплота згоряння палива. ККД нагрівника

Досить часто людина добуває теплову енергію, спалюючи різні речовини. Це відбувається завдяки хімічній реакції горіння, що супроводжується виділенням теплоти. Так, під час згоряння природного газу відбувається хімічна реакція окиснення, внаслідок якої утворюється оксид карбону CO_2 і вода, а також виділяється певна кількість теплоти. Наприклад, під час згоряння 1 м^3 газу, який на 90 відсотків складається з метану CH_4 , виділяється приблизно 40 МДж теплоти. Цієї кількості теплоти достатньо, щоб нагріти майже 100 л води від 0 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Природно, що різні речовини під час горіння виділяють різну кількість теплоти. Найвищу *теплотворну здатність* мають речовини, які називають паливом. Для її характеристики застосовують фізичну величину, яка називається *питомою теплотою згоряння* палива (позначається q). Її числове значення показує, яка кількість теплоти виділяється внаслідок повного згоряння 1 кг палива.

Хімічна реакція, під час якої відбувається окиснення з виділенням теплоти, називається горінням.



Є різні види палива: тверде (вугілля, дрова, сланці, торф), рідке (бензин, мазут, газ, дизпаливо, спирт), газоподібне (метан, пропан, ацетилен).

Одиницею питомої теплоти згоряння палива є джоуль на кілограм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Значення питомої теплоти згоряння деяких видів палива подано в таблиці на форзаці.

За значенням питомої теплоти згоряння палива можна визначити кількість теплоти, яка виділяється під час згоряння 1 кг палива. Наприклад, при спалюванні 1 кг сухих дров виділяється приблизно $12\,000\text{ кДж}$ теплоти. Для того щоб обчислити кількість теплоти, що виділяється внаслідок згоряння

довільної кількості палива, треба питому теплоту згоряння палива помножити на його масу:

$$Q = qm.$$

Задача. Яка кількість теплоти виділиться під час згоряння 40 кг кам'яного вугілля? Скільки води можна нагріти від 10 до 60 °С, витративши всю цю теплоту на її нагрівання?

Дано:

$$m_1 = 40 \text{ кг},$$

$$q = 25\,000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{С},$$

$$t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Розв'язання

$$Q = qm_1; Q = 25 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 40 \text{ кг} =$$

$$= 1000 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1000 \text{ МДж}.$$

З формули кількості теплоти

$Q = cm_2(t_2 - t_1)$ знаходимо масу води:

$$m_2 = \frac{Q}{c(t_2 - t_1)} = 4800 \text{ кг}.$$

$$Q - ?$$

$$m_2 - ?$$

Відповідь. Під час згоряння вугілля виділиться 1000 МДж теплоти, за допомогою якої можна нагріти 4800 кг води від 10 до 60 °С.

Для теплопередачі часто застосовують нагрівники, за допомогою яких можна використати теплоту згоряння палива – газові пальники, спиртівки, печі. Кількість теплоти, яка утворюється під час згоряння в них палива, частково йде на нагрівання тіл, а частина її втрачається (розсіюється в навколишнє середовище, нагріває сам пальник тощо). Тому кажуть про коефіцієнт корисної дії (ККД) нагрівника, який визначає у відсотках частину кількості теплоти $Q_{\text{к}}$, що пішла на нагрівання, від повної кількості теплоти Q , отриманої під час згоряння палива:

$$\text{ККД} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q} \cdot 100\%.$$



ККД нагрівника характеризує ефективність використання теплоти, отриманої внаслідок згоряння палива.

Для того щоб підвищити ККД нагрівника, необхідно збільшувати корисно використану енергію $Q_{\text{к}}$, тобто зменшувати втрати теплоти не за призначенням.



1. Що таке горіння?
2. Чому для одержання теплової енергії використовують паливо?

3. Який фізичний зміст питомої теплоти згоряння палива?
4. За таблицею питомої теплоти згоряння палива (див. форзац) з'ясуйте, яке паливо має найбільшу, а яке – найменшу теплотворну здатність.
5. Оцініть за теплотворною здатністю, чим вигідніше опалювати приміщення – вугіллем чи дровами.
6. Вивчивши будову нагрівника, запропонуйте спосіб, за допомогою якого можна конструктивно підвищити ККД нагрівника.



Вправа 32

1. При повному згорянні бензину виділилося $1,63 \cdot 10^7$ кДж теплоти. Скільки бензину спалено?
2. Скільки дров треба спалити, щоб отримати таку саму кількість теплоти, як від спалювання 1,5 кг бензину?
3. Скільки гасу треба спалити, щоб нагріти 3 л води від 20°C до температури кипіння, якщо на її нагрівання витрачається 60 % енергії?
4. До якої температури можна нагріти 50 л води, температура якої дорівнює 20°C , спаливши 100 г бензину, якщо ККД нагрівника становить 50 %?
5. Який ККД спиртівки, якщо для підвищення температури 0,5 л води на 5°C витрачено 1 г спирту?

175

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

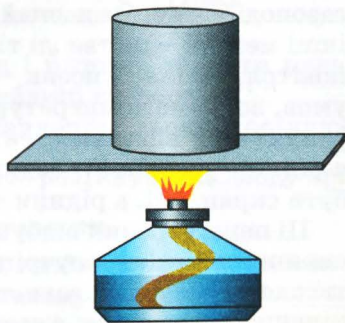
Визначення ККД нагрівника

Мета. Експериментально визначити ККД нагрівника.

Обладнання: посудина з водою, мензурка, алюмінієва посудина, термометр, терези з важками, нагрівник (сухе пальне або свічка).

Вказівки до роботи

Для того щоб визначити ККД нагрівника, необхідно знати, яка кількість теплоти від згоряння палива пішла на нагрівання тіла. З цією метою доцільно використати алюмінієву посудину, в яку налити воду і нагрівати їх за допомогою нагрівника (мал. 146). Кількість теплоти, надану посудині з водою, можна обчислити за формулою: $Q_k = c_1 m_1 \Delta t + c_2 m_2 \Delta t$. Кількість



Мал. 146. Визначення ККД нагрівника

теплоти, отриману від згоряння палива, можна знайти за формулою: $Q = qm_3$. Прирівнявши ці величини, можна обчислити ККД нагрівника:

$$\text{ККД} = \frac{Q_k}{Q} \cdot 100\%.$$

Виконання роботи

1. За допомогою таблиць фізичних величин з'ясуйте питомі теплоємності води c_1 і алюмінію c_2 , питому теплоту згоряння палива нагрівника q .

2. За допомогою важільних терезів визначте масу алюмінієвої посудини m_2 і масу нагрівника до його запалювання.

3. Налийте в алюмінієву посудину 100–150 г води і визначте її масу m_1 .

4. За допомогою термометра виміряйте початкову температуру води.

5. Запаліть нагрівник і почніть нагрівати посудину з водою. Після того як температура води підвищиться на 20–25 °С, загасіть нагрівник і визначте масу використаного пального m_3 як різницю маси нагрівника до і після запалювання.

6. За наведеними вище формулами обчисліть кількість теплоти Q_k і Q .

7. Обчисліть ККД нагрівника.

8. Поясніть, які втрати теплоти відбувалися під час досліду.

176

§ 55. Плавлення твердих тіл. Кристалізація

Як відомо, усі тіла за певних умов перебувають у цілком визначеному агрегатному стані – твердому, рідкому чи газоподібному. За звичайних умов деревина, граніт, залізо та інші метали – це тверді тіла; вода, бензин, ацетон – це рідини; повітря, метан, кисень – гази. Разом з тим зміна фізичних умов, зокрема температури, може спричинити якісні перетворення їхніх властивостей: тверді тіла можуть стати рідинами, а рідини утворити газоподібну пару; і навпаки, гази можуть бути скраплені, а рідини затверднути.

Ці перетворення відбуваються внаслідок теплопередачі, яка спричиняє зміни внутрішньої енергії тіл. Якщо, наприклад, твердому тілу надавати теплоту, його температура поступово підвищуватиметься, а згодом, з досягненням певної температури, воно почне плавитися. Тепловий процес, під час якого тверде тіло переходить у рідкий стан, називається *плавленням*.

Плавлення відбувається по-різному у кристалічних і аморфних тіл. У кристалічних тіл, структура яких має чіткий порядок розміщення атомів і молекул, плавлення починається при досягненні певної температури, яка називається *температурою плавлення*. В аморфних тіл фіксованої температури плавлення немає. Речовини мають різну температуру плавлення. Наприклад, за нормальних умов для вольфраму вона дорівнює 3387 °С, для сталі вона становить 1300–1500 °С, а ртуть плавиться при –39 °С.

Лід, що плаває у воді при 0 °С, буде танути лише за умови надання йому певної кількості теплоти, наприклад, якщо температура повітря вища і тоді відбувається теплообмін.

Плавлення відбувається обов'язково з поглинанням теплоти. Якщо не надавати її тілу, процес плавлення припиниться. Це пояснюється тим, що для послаблення взаємодії між атомами і молекулами в твердому тілі, яка утримує їх у зв'язаному стані, потрібна додаткова енергія, спроможна зруйнувати таке їх упорядковане розміщення. Завдяки теплопередачі така енергія може надходити до тіла і воно почне поступово плавитися. Під час цього процесу температура тіла не змінюється, оскільки вся енергія йде на руйнування зв'язків між атомами і молекулами.

Оскільки у різних речовин атоми і молекули взаємодіють з неоднаковою силою, то для їх плавлення потрібна різна кількість теплоти. Тому для характеристики енергетичних затрат, пов'язаних із переходом речовини з твердого стану в рідкий, вводять фізичну величину, яка називається *питомою теплотою плавлення*. Це фізична величина (позначається λ), що дорівнює кількості теплоти, необхідної для перетворення 1 кг речовини із твердого стану в рідкий за температури плавлення. Вона вимірюється в джоулях на кілограм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

Значення температури плавлення і питомої теплоти плавлення окремих речовин наведено в таблиці на форзаці.

Наприклад, питома теплота плавлення льоду дорівнює $332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Це означає, що для того, щоб розтанув 1 кг льоду при 0 °С, йому потрібно надати 332 кДж теплоти.

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для плавлення твердого тіла будь-якої маси, треба питому теплоту плавлення речовини λ помножити на масу тіла m :

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m.$$

Задача 1. Яка потрібна кількість теплоти, щоб розплавити 2 т чавуну за температури плавлення? Скільки кам'яного вугілля треба спалити, якщо вся енергія палива піде на плавлення чавуну?

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг},$$

$$\lambda = 96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$q = 25\,000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$Q_1 = ?$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання

За означенням теплота плавлення дорівнює: $Q_1 = \lambda m_1$. Отже,

$$Q_1 = 96 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 2000 \text{ кг} = 192 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 192 \text{ МДж}.$$

Оскільки за умовою вся теплота від згоряння вугілля йде на плавлення чавуну, то $Q_2 = Q_1$; $qm_2 = Q_1$. Звідси

$$m_2 = \frac{192 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{25 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} \approx 7,7 \text{ кг}.$$

Відповідь. Для плавлення 2 т чавуну потрібно 192 МДж теплоти; щоб отримати таку кількість теплоти, треба спалити 7,7 кг кам'яного вугілля.

Перехід речовини з твердого стану в рідкий відбувається внаслідок передачі тілу певної кількості теплоти. Зворотний процес – перехід із рідкого стану в твердий – відбуватиметься за умови, якщо рідина втрачатиме енергію, наприклад внаслідок охолодження. Процес переходу рідин у твердий стан називається *твердненням*.

Якщо під час плавлення тверде тіло поглинає енергію, то під час кристалізації навпаки, – рідина віддає частину енергії. Як і у випадку плавлення, для характеристики цього процесу вводять поняття питомої теплоти кристалізації. Її фізичний зміст такий самий, як і питомої теплоти плавлення: це кількість теплоти, необхідна для перетворення 1 кг речовини з рідкого стану в твердий за температури кристалізації. Отже, кількість теплоти, яка виділяється внаслідок кристалізації, визначається як добуток питомої теплоти кристалізації і маси тіла:

$$Q_{\text{кр}} = \lambda m.$$



Для перетворення 1 кг речовини із твердого стану в рідкий або навпаки – з рідкого в твердий потрібна однакова кількість теплоти.

Встановлено, що кристалізація відбувається при тій самій температурі, за якої дана речовина плавиться. Так, спирт кристалізується при -115°C , бензин при -60°C , олія при -16°C . До того ж питома теплота плавлення і питома теплота кристалізації мають однакові значення.

Задача 2. Яку кількість теплоти треба відібрати у води при 0°C , щоб утворилося 5 кг льоду?

Дано:

$$m = 5 \text{ кг},$$

$$\lambda = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$Q_{\text{кр}} = ?$$

Розв'язання

За означенням $Q_{\text{кр}} = \lambda m$.

$$Q_{\text{кр}} = 332 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ кг} = 1660 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Під час утворення 5 кг льоду виділяється 1660 кДж.

1. Який процес називається плавленням? Охарактеризуйте умови плавлення твердих тіл.
2. Назвіть теплові процеси, що відбуваються під час плавлення металу в доменній печі.
3. У чому полягає фізичний зміст питомої теплоти плавлення?
4. Який тепловий процес зворотний до плавлення?
5. Чому в тиху погоду, коли випадає сніг, підвищується температура повітря?
6. Чому під час плавлення кристалічних тіл температура залишається сталою?

179



§ 56. Приклади розв'язування задач

Під час розв'язування задач на розрахунок теплових процесів з урахуванням плавлення і кристалізації тіл слід керуватися загальними правилами складання рівняння теплового балансу (див. § 53). Разом з тим існують певні настанови, яких у даному разі варто дотримуватися.

По-перше, слід ураховувати, що плавлення і кристалізація відбуваються за умови досягнення певної температури тіл – температури плавлення (кристалізації). З огляду на це, інколи треба обчислювати кількість теплоти, необхідну для нагрівання чи охолодження тіла до температури плавлення (кристалізації).

По-друге, плавлення буде відбуватися, якщо тіло отримує певну кількість теплоти, і навпаки, під час кристалізації тіла

втрачають теплову енергію. При цьому температура тіл не змінюється.

Ці правила разом з умовою теплового балансу визначають послідовність дій, яких доцільно дотримуватися в процесі розв'язування задач з урахуванням процесів плавлення і кристалізації.

Крок 1. З умови задачі з'ясувати температуру тіл, які перебувають у теплообміні. Якщо вона більша або менша за температуру плавлення, врахувати це при складанні рівняння.

Крок 2. Установити, які теплові процеси відбуваються за умовою задачі. Записати формули кількості теплоти для кожного з них.

Крок 3. Якщо в теплообмінному процесі перебуває кілька тіл, одні з яких поглинають теплоту, а інші віддають її, скласти рівняння теплового балансу з урахуванням таких правил: у лівій його частині записати суму кількостей теплот, яку отримали тіла під час теплообміну; у правій його частині – суму кількостей теплот, яку віддали тіла внаслідок цього.

Крок 4. Розв'язати рівняння відносно шуканої величини і знайти її значення.

Наводимо приклади розв'язування задач на розрахунок кількості теплоти з урахуванням плавлення і кристалізації тіл.

Задача 1. Яку кількість теплоти треба затратити, щоб розплавити 10 кг алюмінію, температура якого дорівнює 20 °С?

Дано:

$$m = 10 \text{ кг},$$

$$\lambda = 393 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$t_0 = 20 \text{ °С},$$

$$t_{\text{пл}} = 660 \text{ °С},$$

$$c = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$Q = ?$

Розв'язання

Щоб розплавити алюміній, треба спочатку нагріти його до температури плавлення (660 °С), затративши кількість теплоти $Q_1 = cm(t_{\text{пл}} - t_0)$.

Кількість теплоти, необхідна для плавлення алюмінію, $Q_2 = \lambda m$.

Загалом потрібна кількість теплоти $Q = Q_1 + Q_2$.

$$Q = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 10 \text{ кг} \cdot 640 \text{ °С} + 393 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 10 \text{ кг} = 9\,690\,000 \text{ Дж}.$$

Відповідь. Для плавлення 10 кг алюмінію треба 9,7 МДж теплоти.

Задача 2. Внутрішня енергія 5 кг води, що перебувала при кімнатній температурі, внаслідок охолодження зменшилася на 1 МДж. Які теплові процеси відбулися? Скільки льоду при цьому утворилося?

Дано:

$$\Delta U = 1 \text{ МДж},$$

$$m_1 = 5 \text{ кг},$$

$$\lambda = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{пл}} = 0 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}.$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання

Під час охолодження води до температури $0 \text{ }^\circ\text{C}$, при якій утворюється лід, вона втратила частину внутрішньої енергії, що дорівнює:

$$Q_1 = cm_1(t_0 - t_{\text{пл}}) =$$

$$= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 5 \text{ кг} \cdot 20 \text{ }^\circ\text{C} =$$

$$= 420\,000 \text{ Дж} = 0,42 \text{ МДж}.$$

Подальше зменшення внутрішньої енергії відбувалося за рахунок утворення льоду: $Q_2 = \lambda m_2$.

Оскільки $Q_2 = 1 \text{ МДж} - 0,42 \text{ МДж} = 0,58 \text{ МДж}$, то

$$m_2 = \frac{580 \text{ кДж}}{332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 1,75 \text{ кг}.$$

Відповідь. Спочатку відбулося охолодження води до $0 \text{ }^\circ\text{C}$, а потім утворилося 1,75 кг льоду.

181

Вправа 33

1. Яка кількість теплоти потрібна, щоб розплавити 2,5 кг міді за температури плавлення?

2. Яку кількість теплоти втрачає 200 г алюмінію під час кристалізації і подальшого охолодження до кімнатної температури?

3. У воді, маса якої 2 кг і температура $0 \text{ }^\circ\text{C}$, плаває 0,5 кг льоду. Яка кількість теплоти потрібна для того, щоб довести воду до кипіння?

4. У воду, маса якої 1 кг і температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$, вкинули лід, температура якого $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Після того як лід розтанув, температура води знизилася до $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Скільки льоду вкинули у воду?

5. Залізний брусок, маса якого дорівнює 0,5 кг і температура $400 \text{ }^\circ\text{C}$, поклали на брилу льоду, температура якого $-5 \text{ }^\circ\text{C}$. Скільки води утворилося при цьому, якщо вся теплота пішла на плавлення льоду?

§ 57. Випаровування і конденсація рідин

У житті ми досить часто спостерігаємо перехід рідин у газоподібний стан: висихають калюжі після дощу, сохне випрана білизна, рівень води у відкритих водоймах улітку знижується тощо. Це явище називається випаровуванням. З позицій атомно-молекулярного вчення його можна пояснити тим, що частина молекул, які мають достатню кінетичну енергію, вилітають за межі поверхні рідини й утворюють пару – газоподібний стан рідини.



Випаровування властиве і твердим тілам (пригадайте, що в морозну погоду мокра білизна вкривається льодом, але також висихає). Для твердих тіл цей процес називається сублімацією.

182

Енергетичні витрати на випаровування рідин характеризує питома теплота пароутворення. Це фізична величина, яка визначає кількість теплоти, необхідної для випаровування 1 кг рідини за даної температури. Вона позначається літерою r і вимірюється в джоулях на кілограм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

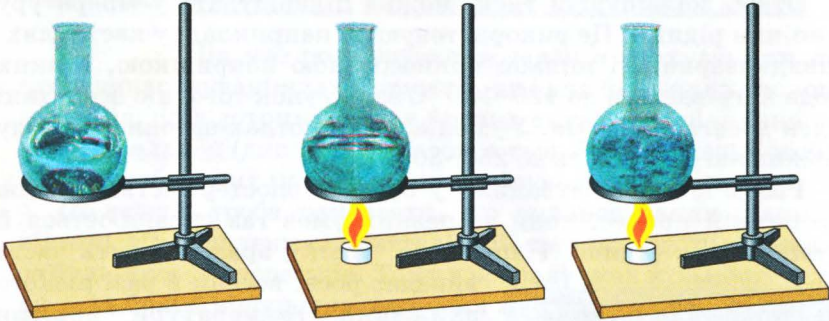
Числове значення питомої теплоти пароутворення залежить від різних факторів, зокрема від температури і тиску. Наприклад, питома теплота пароутворення води при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ за нормального атмосферного тиску (760 мм рт. ст.) дорівнює $2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $2454 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, а за температури кипіння ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) – $2257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Це означає, що для випаровування 1 кг води, взятої при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, за нормальних умов треба затратити 2500 кДж теплоти, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2257 кДж. Значення питомої теплоти пароутворення (конденсації) деяких речовин за температури кипіння і нормального атмосферного тиску наведено в таблиці на форзаці.

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для випаровування рідини довільної маси, треба її питому теплоту пароутворення помножити на масу:

$$Q_{\text{п}} = rm.$$

Найінтенсивніше випаровування відбувається під час кипіння рідини. Щоб пояснити цей процес, наллємо у прозору

скляну колбу воду й будемо спостерігати, що з нею відбуватиметься під час нагрівання (мал. 147).

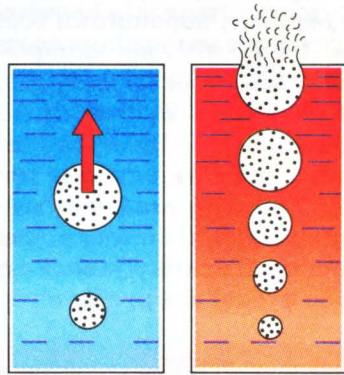


Мал. 147. Кипіння води

Спочатку на дні і стінках посудини будуть утворюватися бульбашки. Це повітря, яке розчинене у воді внаслідок проникнення в неї молекул газу. Нагрівання води приведе з часом до того, що з підвищенням температури повітряні бульбашки збільшуватимуться в об'ємі (мал. 148). Відбувається внутрішнє випаровування, і всередині бульбашки утворюється водяна пара.

Під час закипання води ми чуємо характерний шум: під дією сили Архімеда бульбашки починають спливати, і в момент досягнення поверхні вони лопаються і водяна пара з шумом виривається назовні. При цьому температура рідини залишається сталою, оскільки вся теплота, що надається рідині, йде на внутрішнє випаровування в усьому її об'ємі. Таким чином, кипіння — це внутрішнє випаровування рідини, внаслідок якого пара, що утворилася всередині, викидається назовні.

Температура, за якої кипить рідина, називається *температурою кипіння*. У кожної речовини вона має своє певне значення і залежить від різних факторів, зокрема від зовнішнього тиску. Це пояснюється тим, що бульбашкам із паром для виходу назовні треба подолати його протидію. Тому з підвищенням тиску зростатиме температура кипіння, і навпаки, зі зниженням його вона зменшуватиметься. Наприклад, у високих горах



Мал. 148. Утворення бульбашок пари під час кипіння

вода кипітиме за значно нижчої температури, ніж за нормального атмосферного тиску.

Отже, збільшуючи тиск, можна підвищувати температуру кипіння рідини. Це використовують, наприклад, у каstrулях-швидковарках зі щільно припасованою покpишкою, в яких вода нагpівається до 120–150 °C за рахунок того, що всередині тиск досягає 2–5 гПа. У спеціальних котлах-автоклавах воду можна нагpіти навіть до 250–300 °C.

Разом із випаровуванням у природі спостерігається також зворотний процес, коли за певних умов газ скраплюється й утворюється рідина. Наприклад, улітку вранці досить часто

випадає роса, восени в разі різкого зниження температури повітря утворюється туман тощо. Процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називається *конденсацією*. Як правило, вона відбувається

на поверхні рідини або твердого тіла; у газах для цього потрібні центри конденсації, роль яких відіграють різні домішки, порошинки тощо.

На відміну від випаровування, під час якого теплота поглинається, при конденсації теплота виділяється. Її кількість визначають за тією самою формулою, що і теплоту пароутворення: $Q_{\text{п}} = rm$. Питома теплота конденсації за значенням така сама, як і питома теплота пароутворення.

Крім того, за певних умов можлива конденсація речовини з газоподібного стану відразу в твердий. Так, наприклад, з водяної пари взимку утворюються сніжинки та паморозь на деревах або чудові візерунки на склі вікон у морозну погоду.

Конденсацією водяної пари в атмосфері пояснюється утворення хмар.

1. Зробіть висновок про те, як питома теплота пароутворення залежить від температури.
2. Який фізичний зміст питомої теплоти пароутворення? Що означає її значення $520 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$?
3. Як називається процес, зворотний до випаровування? Чим вони відрізняються з енергетичної точки зору?
4. У чому полягає суть явища кипіння?
5. Чому температура кипіння залежить від зовнішнього тиску?
6. Чому в горах вода кипить за нижчої температури, ніж біля підніжжя гір?
7. Яким чином можна підвищити температуру кипіння рідини?

§ 58. Приклади розв'язування задач

Під час розв'язування задач з урахуванням процесів випаровування і конденсації, як і для будь-яких теплових процесів, слід дотримуватися правил складання рівняння теплового балансу (див. § 53). Разом з тим існують певні особливості перебігу цих процесів, які доцільно брати до уваги.

По-перше, треба пам'ятати, що випаровування рідин, на відміну від плавлення і кристалізації твердих тіл, відбувається за будь-якої температури. Тому в розрахунках кількості теплоти слід брати відповідне значення питомої теплоти пароутворення для заданої температури. Якщо в умові задачі воно не зазначається, то з таблиць беруть значення, як для температури кипіння, проте враховують, що рідину необхідно нагріти до цієї температури. У такому разі загальна кількість теплоти дорівнює $Q_1 + Q_2 = cm\Delta t + rm$.

По-друге, при складанні рівняння треба враховувати, що випаровування рідини вимагає надання їй певної кількості теплоти, а конденсація – навпаки, супроводжується виділенням теплоти.

По-третє, конденсація відбувається за певних фізичних умов, які залежать від температури і тиску. Недотримання цих умов, які зазначаються в умові задачі, виключає можливість самого явища.

Задача 1. Яку кількість теплоти треба затратити, щоб нагріти 5 кг води від 0 °С до температури кипіння і випарувати її повністю за нормального атмосферного тиску?

Дано:

$$m = 5 \text{ кг},$$

$$t_1 = 0 \text{ °С},$$

$$t_2 = 100 \text{ °С},$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$Q = ?$

Розв'язання

За умовою воду спочатку нагрівають від 0 до 100 °С, а потім випаровують. Отже, $Q = cm(t_2 - t_1) + rm$.

$$\begin{aligned} Q &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 5 \text{ кг} \cdot 100 \text{ °С} + \\ &+ 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ кг} = 13\,600\,000 \text{ Дж} = \\ &= 13,6 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

Відповідь. Для нагрівання і випаровування 5 кг води потрібно 13,6 МДж теплоти.

Задача 2. Воді масою 2 кг за кімнатної температури (20 °С) надано 1050 кДж теплоти. Скільки води при цьому випарувалося?

Дано:

$$Q = 1050 \text{ кДж},$$

$$m_1 = 2 \text{ кг},$$

$$r_{20} = 2450 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$r_{100} = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$t_1 = 20 \text{ °С},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання

Оскільки в умові задачі не вказано, яким чином відбувалося випаровування – з нагріванням до кипіння чи за кімнатної температури, розглянемо обидва випадки.

1) Якщо випаровування відбувається за температури 20 °С, то $Q = r_{20} \cdot m_2$. Звідси $m_2 = 0,43 \text{ кг}$.

2) Якщо випаровування відбувається з нагріванням до кипіння $t_2 = 100 \text{ °С}$, то $Q = cm_1(t_2 - t_1) + r_{100} \cdot m_2$. Звідси $m_2 = 0,17 \text{ кг}$.

Відповідь. Залежно від способу випаровування, за допомогою 1050 кДж теплоти можна випарувати 0,43 кг або 0,17 кг води.

Задача 3. Яка кількість теплоти виділиться при конденсації 200 г водяної пари за температури 100 °С? Порівняйте її з кількістю теплоти, необхідною для нагрівання такої самої маси води від 0 до 100 °С.

Дано:

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг},$$

$$t_1 = 0 \text{ °С},$$

$$t_2 = 100 \text{ °С},$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$Q_k = ?$$

Розв'язання

$$\text{За означенням } Q_k = rm = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,2 \text{ кг} = 460 \text{ кДж}.$$

Для нагрівання від 0 до 100 °С необхідно

$$Q = cm\Delta t = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 100 \text{ °С} = 84 \text{ кДж}.$$

$$\text{Отже, } \frac{Q_k}{Q} = 5,5.$$

Відповідь. Під час конденсації пари виділяється 460 кДж теплоти. Це в 5,5 раза більше, ніж витрачається на нагрівання такої самої маси води від 0 до 100 °С.

Задача 4. У калориметр, в якому міститься 1 кг води при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, впустили 100 г водяної пари, температура якої $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Яка температура води буде в калориметрі після встановлення теплової рівноваги?

Дано:

$$m_1 = 1 \text{ кг},$$

$$m_2 = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}},$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$t_1 = 10\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$t = ?$$

Розв'язання

У теплообмінному процесі перебувають вода і водяна пара. Внаслідок конденсації водяна пара і вода, що утворилася, віддають теплоту, а вода в калориметрі її поглинає. Тоді рівняння теплового балансу має вигляд:

$$cm_1(t - t_1) = rm_2 + cm_2(t_2 - t).$$

Розв'язавши рівняння відносно невідомого t , знайдемо:

$$4620 t = 314 \cdot 10^3.$$

$$\text{Звідси } t = 68\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відповідь. Температура води становитиме $68\text{ }^{\circ}\text{C}$.

187

Вправа 34

1. Яку кількість теплоти треба надати 50 г води, температура якої $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, щоб довести її до кипіння і перетворити половину її в пару?

2. В алюмінієвий калориметр масою 0,2 кг, в якому знаходиться 150 г води за температури $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, впустили пару, температура якої $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скільки водяної пари потрібно, щоб у калориметрі встановилася температура $50\text{ }^{\circ}\text{C}$?

3. Якою була температура води, якщо для нагрівання 500 г води і перетворення 100 г її в пару витрачено 420 кДж теплоти?

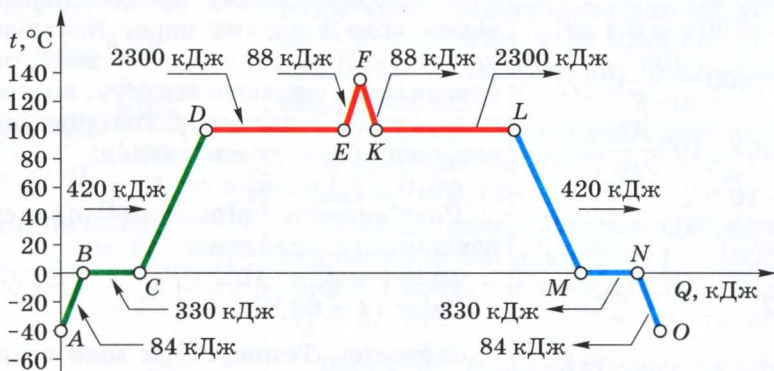
4. У посудину, в якій міститься 2 кг льоду за температури $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, впустили 0,2 кг водяної пари, температура якої $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чи розплавиться весь лід?

§ 59. Пояснення зміни агрегатних станів речовини на основі атомно-молекулярного вчення

Як відомо, речовина перебуває в одному з агрегатних станів – твердому, рідкому чи газоподібному, залежно від характеру руху і взаємодії атомів і молекул. Надання чи відби-

рання у тіла кількості теплоти може призвести до зміни агрегатного стану речовини. При цьому змінюється внутрішня енергія тіла. Пояснимо, як це відбувається, на прикладі води.

Візьмемо лід масою 1 кг за температури -40°C і будемо спостерігати за змінами, що відбуватимуться внаслідок надання йому певної кількості теплоти (мал. 149).



Мал. 149. Графік зміни агрегатного стану води
(масштаб щодо значення кількості теплоти не дотримано)

Ділянка AB – нагрівання льоду, ділянка BC – танення льоду.

Спочатку термометр фіксуватиме підвищення його температури від -40°C до 0°C (температура плавлення), але лід не буде танути. У твердому стані молекули води жорстко зв'язані між собою і вони можуть лише коливатися у вузлах кристалічної ґратки. Очевидно, що підвищення температури льоду впливатиме на їх рухливість, проте потенціальна енергія взаємодії значно перевищує кінетичну енергію коливань, і тому форма тіла зберігається. При досягненні температури плавлення (точка B) потенціальна і кінетична енергії стають приблизно однаковими і тому зв'язки між молекулами можуть розриватися – лід починає танути, якщо йому продовжувати надавати теплоту. Утворюється суміш води і льоду, температура якої не змінюється (ділянка BC), доки весь лід не розтане (точка C).

Ділянка CD – нагрівання води, ділянка DE – випаровування води.

Подальша передача теплоти вестиме до нагрівання води, молекули якої стають більш рухливими. Кінетична енергія руху молекул води перевищує потенціальну енергію взаємодії між ними, окремі з них стають спроможними вилітати за межі рідини, утворюючи пару. Під час кипіння (точка D) температура

не зростає і вся надана кількість теплоти йде на подолання потенціальної енергії міжмолекулярної взаємодії і перетворення рідини в пару (газоподібний стан).

Ділянка EF – нагрівання пари.

У цьому стані кінетична енергія руху молекул набагато перевищує потенціальну енергію їхньої взаємодії. Якщо посудина буде закритою, то подальше надання теплоти супроводжуватиметься підвищенням температури водяної пари. При цьому молекули води вільно рухаються і взаємодіють між собою лише під час короткочасних зіткнень. Чим вищою стає температура пари, тим швидше вони рухатимуться, тим вищою стає їх кінетична енергія.

Розглянемо тепер зворотні процеси, які супроводжуватимуть відбирання у тіла енергії.

Ділянка FK – охолодження пари, ділянка KL – конденсація пари.

Якщо водяну пару охолоджувати (ділянка FK), то кінетична енергія її молекул зменшуватиметься. Згодом настане момент (точка K), коли пара почне конденсуватися. Залежно від тиску, це може відбуватися за різної температури, адже температура кипіння рідин залежить від тиску. За нормального тиску (760 мм рт. ст.) це станеться за температури кипіння води (100 °C). За цих умов середня кінетична і потенціальна енергії молекул стають приблизно однаковими і молекули починають взаємодіяти між собою таким чином, що буде утворюватися рідина. Щоб конденсація продовжувалася, необхідно відбирати у пари частину внутрішньої енергії. При цьому температура залишатиметься сталою (ділянка KL), адже рідина виділятиме таку кількість теплоти, на скільки зменшуватиметься її внутрішня енергія.

Ділянка LM – охолодження води.

Подальше відбирання теплоти спричинить охолодження рідини (ділянка LM) до певної температури (для води це 0 °C). Молекули води втрачатимуть рухливість, і їх кінетична енергія зменшуватиметься. Настане момент (точка M), коли потенціальна енергія взаємодії молекул значно переважатиме їхню кінетичну енергію і почнеться кристалізація – утворення льоду.

Ділянка MN – кристалізація води, ділянка NO – зниження температури льоду.

Кристалізація відбувається за тієї самої температури, що й плавлення. Упродовж кристалізації вона залишається сталою, оскільки в цей час внутрішня енергія тіла зменшується рівно на

таку саму кількість теплоти, яка виділяється при цьому. Після того як вода перейде у твердий стан (точка N), подальше відбирання енергії знижуватиме температуру льоду (ділянка NO).

Таким чином, із графіка зміни агрегатних станів речовини видно, що плин зворотних теплових процесів (охолодження, конденсація, кристалізація) відбувається симетрично до процесів, які мали місце в разі надання теплоти (нагрівання, плавлення, випаровування)¹. При цьому:

а) температури плавлення і кристалізації речовини однакові;

б) кількість теплоти, необхідна для плавлення речовини в твердому стані, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється під час кристалізації такої самої маси речовини;

в) пара конденсується за тієї самої температури, за якої дана рідина кипить;

г) кількість теплоти, що поглинається під час випаровування, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється при конденсації такої самої маси пари.

190



1. Поясніть, що відбуватиметься, якщо припинити нагрівання води в точці C за графіком (див. мал. 149). Чи буде випаровуватися у цьому разі вода?
2. Що станеться, якщо припинити теплообмін у точці, яка міститься посередині ділянки BC ?
3. Опишіть теплові процеси, що відбуватимуться в реальних умовах після того, як припинити теплопередачу під час кипіння води. Чому її температура знижуватиметься?
4. У кювету з розплавленим металом за температури плавлення вкидають шматок цього самого металу кімнатної температури. Що відбуватиметься, якщо теплообмін існує лише між ними?
5. Навесні в озері плаває крижина. Опишіть усі теплові процеси, що з нею відбуваються.

§ 60. Перетворення теплової енергії в механічну. Принцип дії теплових машин

Споконвіку людина замислювалася над тим, як зробити механізми, які б допомагали їй виконувати важку роботу. Спочатку вона використовувала прості механізми – важелі, похилу площину, різні передавальні механізми, блоки тощо.

¹ Графік буде симетричним, якщо нагрівник і охолоджувач мають однакову потужність, втратами енергії можна знехтувати.

Відтоді як людство пізнало закономірності перебігу теплових явищ, учені намагалися знайти спосіб використання теплової енергії, зокрема перетворення її в механічну.

У 1784 р. англійський винахідник Дж. Уатт створив перший паровий двигун, який тривалий час використовувався як універсальний двигун, що приводив у рух паровози і пароплави, навіть перші автомобілі. Трохи раніше, у 1766 р., російський винахідник І.І. Ползунов створив парову машину, яка працювала на одному з гірничодобувних заводів Уралу.

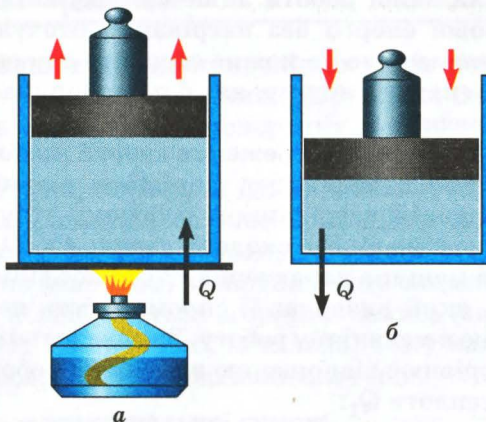
Для пояснення принципу дії теплових машин виконаємо дослід. Візьмемо циліндр із поршнем, покладемо на нього вантаж, наприклад гирю, і почнемо нагрівати газ у циліндрі під поршнем (мал. 150). З підвищенням температури газу поршень почне поступово рухатися вгору, оскільки внаслідок нагрівання газ розширюється. Отже, під час теплопередачі газ виконує механічну роботу, піднімаючи вантаж на певну висоту.

Якщо нагрівання газу припинити, то завдяки теплообміну з навколишнім середовищем він почне остигати, його об'єм зменшуватиметься і поршень буде рухатися вниз.

Теплова машина – це механізм, який виконує механічну роботу за рахунок теплової енергії.

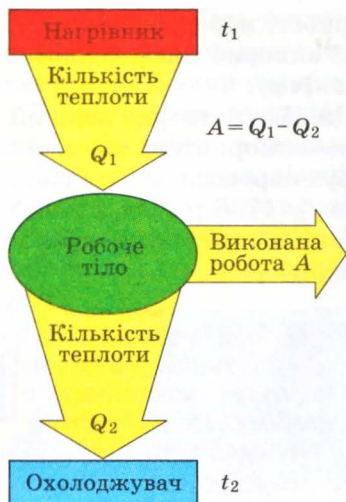


191



Мал. 150. Виконання роботи внаслідок нагрівання газу в циліндрі з поршнем

На цьому принципі перетворення теплової енергії в механічну шляхом виконання роботи побудована дія всіх теплових машин. До них належать двигуни внутрішнього згоряння, парові й газові турбіни, дизельні й турбореактивні двигуни тощо. З часу їх винайдення вони постійно удосконалюються, але їх



Мал. 151. Принцип дії теплової машини

будова ґрунтується на закономірностях перетворення теплової енергії в механічну.

У 1824 р. французький учений С. Карно встановив, що тепла машина конструктивно має складатися з нагрівника (джерела теплоти), робочого тіла, яке, власне, виконує роботу (наприклад, пара в парових двигунах або суміш повітря і пари бензину в двигунах внутрішнього згоряння), і охолоджувача (мал. 151). Така машина спроможна виконувати роботу за умови, якщо температура охолоджувача буде нижчою за температуру нагрівника.

У 1851 р. англійський фізик В. Томсон (лорд Кельвін) сформулював закон, який відіграв

вирішальну роль у створенні теплових машин. Він установив, що в природі неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплової енергії без нагрівання оточуючих тіл. Це твердження означає, що не можна створити так званий вічний двигун, тобто теплову машину, яка б перетворила в роботу всю її внутрішню енергію.

Як відомо, за законом збереження енергії механічна робота, виконана тепловою машиною, дорівнює різниці кількості теплоти Q_1 , наданій нагрівником робочому тілу, і кількості теплоти Q_2 , яку воно віддає охолоджувачу: $A = Q_1 - Q_2$. Отже, кожна тепла машина характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД), який визначає її спроможність перетворювати теплову енергію в механічну роботу. За означенням ККД теплової машини дорівнює відношенню виконаної роботи A до наданої кількості теплоти Q_1 :

$$\text{ККД} = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Оскільки $Q_1 > Q_2$, можна зробити висновок, що ККД теплових машин завжди менший за 1.

Інколи ККД визначають у відсотках. Тоді необхідно значення ККД помножити на 100 %. Теплові двигуни мають невисокий ККД, як правило 20–30 %.

1. За рахунок чого газ виконує роботу під час теплопередачі?
2. Які механізми називають тепловими машинами?
3. З яких конструктивних елементів складається будь-яка теплова машина?
4. Який фундаментальний висновок покладено в основу дії теплових машин?
5. Чому не можна створити вічний двигун?
6. Що характеризує ККД теплової машини? Чому він завжди менший за 1?



Вправа 35

1. Двигун внутрішнього згоряння автомобіля має потужність 37 кВт, а його ККД дорівнює 20 %. Яку кількість бензину він споживає за 1 год роботи?

2. Двигун трактора може розвивати потужність 60 кВт, споживаючи при цьому в середньому 18 кг дизельного пального за 1 год. Визначити ККД цього двигуна.

193

§ 61. Двигун внутрішнього згоряння

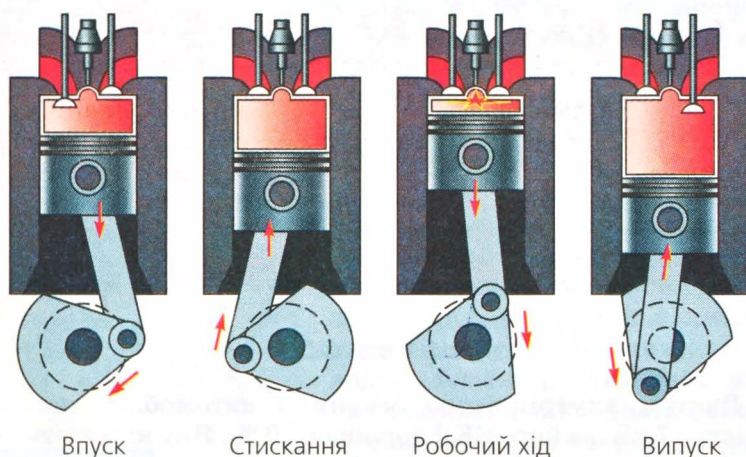
Одним із найпоширеніших видів теплової машини є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ), який нині широко використовується в різних транспортних засобах, зокрема в автомобілях.

Розрізняють карбюраторні ДВЗ і дизельні (названі на честь їх винахідника, німецького інженера Р. Дизеля).

Розглянемо принцип дії чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння (мал. 152). Основним його елементом є циліндр із поршнем, де відбувається згоряння палива (звідси походить назва двигуна). Як правило, їх кілька. Тому кажуть про дво-, чотири- чи восьмициліндрові двигуни тощо.

- I такт* – впуск пальної суміші.
- II такт* – стискання суміші.
- III такт* – робочий хід.
- IV такт* – випуск відпрацьованих газів.

Циліндр має два отвори з клапанами – впускним і випускним. Робота ДВЗ ґрунтується на чотирьох послідовних процесах – тактах, які весь час повторюються. Перший такт – це впуск пальної суміші, що здійснюється через впускний клапан, коли поршень рухається вниз. Після того як поршень досягне



Мал. 152. Схема роботи чотиритактного ДВЗ

194

нижньої точки, всмоктування палива припиняється і обидва клапани закриваються. Під час другого такту, коли поршень рухається вгору, відбувається стиснення суміші, внаслідок чого її температура підвищується. У верхній точці поршня суміш запалюється іскрою від електричної свічки (у карбюраторних двигунах) або від високої температури сильно стиснутого газу (в дизельних двигунах). Суміш спалахує, внаслідок значного нагрівання газ розширюється й тисне на поршень. Сила тиску штовхає поршень донизу, відбувається третій такт – робочий хід, під час якого виконується робота. За допомогою спеціального з'єднання – кривошипно-шатунного механізму – рух поршня передається колінчастому валу, який з'єднано з колесами автомобіля. Виконуючи роботу, суміш розширюється й одночасно охолоджується. Після проходження поршнем нижньої точки відкривається випускний клапан і під час руху поршня вгору відбувається четвертий такт – випуск відпрацьованих газів. Таким чином, робочий цикл чотиритактного двигуна завершується, і згодом все починається з першого такту.

Оскільки з чотирьох тактів ДВЗ лише один – робочий, двигун має інерційний механізм – маховик. Він запасав енергію, за рахунок якої колінчастий вал обертається під час виконання решти тактів.



1. Які існують види двигунів внутрішнього згоряння?
2. Назвіть процеси, що відбуваються в чотиритактному ДВЗ.

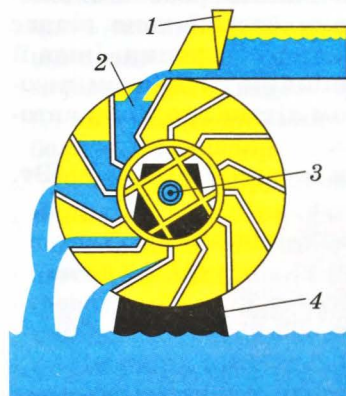
§ 62. Парова і газова турбіни

Для перетворення теплової енергії в механічну на теплових і атомних електростанціях використовують турбіни. Турбіни як основний рушійний елемент застосовують також у газотурбінних двигунах, що широко використовуються в авіації. Залежно від робочого тіла (пари або газу) розрізняють парові й газові турбіни.

В основу дії турбін покладено обертання колеса з лопатками під тиском водяної пари або газу. Цю ідею людина здавна реалізувала в роботі вітряків і водяних млинів: потік води тисне на ковші колеса млина і під дією ваги води змушує їх обертатися (мал. 153).

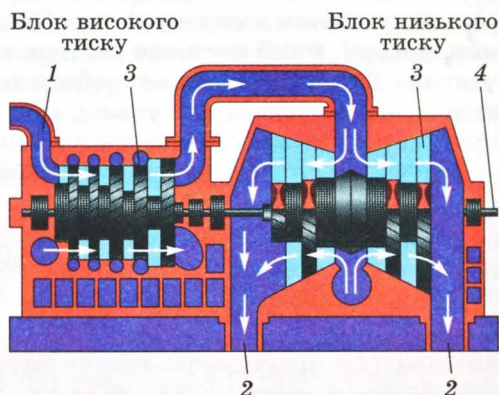
У парових турбінах перетворення енергії відбувається через різницю тисків водяної пари на вході (вхідний паропровід 1) і виході (вихідний паропровід 2) (мал. 154). Тому вона має блоки

Слово «турбіна» походить від латинського turbo – вихор, обертання з великою швидкістю.



Мал. 153. Колесо водяного млина:

- 1 – регулювальна заслінка;
2 – ківш; 3 – робочий вал;
4 – опора



Мал. 154. Парова турбіна

високого і низького тиску. На шляху водяної пари знаходяться робочі колеса 3 з лопатками, яких, як правило, кілька. Пара, що виробляється в паровому котлі теплоелектростанції, спрямовується під високим тиском по вхідному паропроводу 1 до робочих коліс. Вона тисне на їхні лопаті, через що турбіна обертається.



Теплоенергетична установка перетворює теплову енергію в механічну.

Таким чином, теплова енергія водяної пари, виробленої в теплоенергетичній установці електростанції, завдяки турбіні перетворюється в механічну енергію. У свою чергу, за допомогою особливого пристрою,

який називається генератором, механічна енергія перетворюється в електричну.

Парові турбіни сучасних теплоелектростанцій розвивають потужність до 1300 МВт.



Газова турбіна відрізняється від парової тим, що в ній є спеціальна камера згоряння, яка підвищує енергетичну ефективність установки.

У газових турбінах додатково встановлюють спеціальну камеру згоряння, в яку впорскується паливо. Стиснуте в ній повітря має дуже високу температуру, і тому упорснуте паливо запалюється. Відбувається стрімке підвищення його температури. Під високим тиском газ тисне на лопатки робочого колеса, обертаючи газову турбіну. Частину енергії вона віддає компресору, який нагнітає повітря в камеру згоряння. Інша її частина йде на виконання роботи рушійним елементом газотурбінного двигуна, наприклад гвинтом літака, колесом автомобіля, валом електрогенератора тощо.

Потужність сучасних газових турбін досягає 100... 150 МВт.

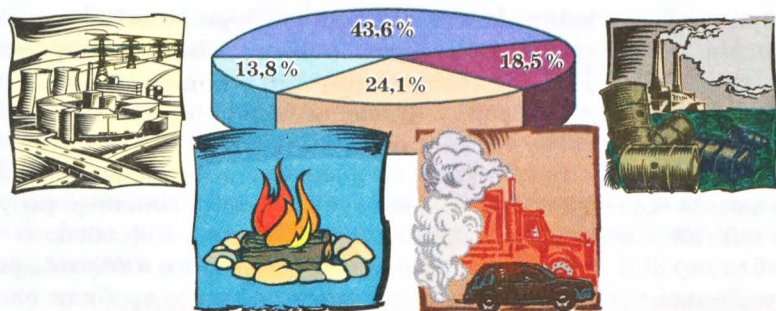
196



1. Які бувають турбіни? За якою ознакою їх поділяють?
2. Що є основним елементом турбіни?
3. Що покладено в основу дії парової турбіни?
4. У чому полягає конструктивна відмінність парової і газової турбін?
5. Де використовують парові та газові турбіни?

§ 63. Екологічні проблеми використання теплових машин

Широке використання теплових машин у житті людини призвело до загострення екологічних проблем, пов'язаних із викидами в атмосферу шкідливих речовин. Серед них особливе місце належить діоксиду карбону CO_2 , який небезпечний тим, що створює «парниковий ефект», унаслідок чого температура повітря на Землі підвищується. За даними міжнародних обстежень, порівняно з 1961 р. середня температура

Мал. 155. Джерела викидів CO₂ в атмосферу

повітря на Землі зросла майже на 1 °С. Основною причиною зміни клімату нашої планети вчені вважають зростання викидів діоксиду карбону в атмосферу.

У світі з різних джерел нині потрапляє в атмосферу майже 30 млрд т CO₂, а лісами поглинається лише 4 млрд т; частка України в цьому загальносвітовому процесі складає 1,1 %. У загальному викиді CO₂ в атмосферу майже половина належить самим виробникам енергії – тепловим електростанціям, що працюють на вугіллі, нафті або газі (мал. 155). Викиди автомобільного та іншого транспорту становлять 24,1 %. Решта – це виробнича діяльність (заводи і фабрики), процеси життєзабезпечення тощо.

У природі порушена динамічна рівновага для відновлення кисню в реакціях фотосинтезу. Якщо не вживати ніяких заходів щодо поліпшення екологічної ситуації, це може призвести до жахливих катастроф, які загрожуватимуть усьому людству. Тому останнім часом пропонуються заходи, спрямовані на зменшення викидів CO₂ в атмосферу.

Зокрема, виробники автомобільних двигунів пропонують різні технічні удосконалення ДВЗ. Це запровадження різних каталізаторів і фільтрів, які покращують екологічні показники двигунів. Наприклад, на виставці у США автомобіль «Mercedes-Benz E-320» був відзначений за впровадження паливної системи, яка зменшує викиди діоксиду карбону на 80 % і доводить їх до екологічних норм «Євро-5». Проте такі удосконалення відбуваються в основному за рахунок зменшення потужності і ККД двигуна, що погіршує його технічні характеристики.

Використання удосконалених технологій у ДВЗ не може зняти проблему викидів CO₂, оскільки продуктами згоряння в цих двигунах є нафтопродукти (бензин чи дизельне паливо). Тому зараз пропонуються інші підходи в автомобілебудуванні.

Наприклад, виробники автомобілів «Toyota» виготовляють машини з гібридним приводом, в яких використовуються два типи двигунів – електричний і ДВЗ. Електродвигуни конструктивно вмонтовані в кожне колесо і допомагають ДВЗ, створюючи додаткову тягу.

Існують також конструктивні розробки електромобілів, які працюють від акумуляторних батарей. Проте незначний ресурс звичайних кислотних акумуляторних батарей (сьогодні це приблизно 300–400 км на одному заряді батареї), а також проблеми їхньої утилізації не дають змоги поки що зробити електромобілі масовими. Хоча ведуться пошуки компактних і легких акумуляторів, зокрема на так званих водневих елементах.

Останнім часом інженери провідних автомобільних фірм «Ford» і «Volvo» впроваджують двигуни, які спроможні працювати на бензині та альтернативному виді палива – біоетанолі або їх суміші, що знижує викиди CO_2 до 30–80 %.

Проте використання всіх цих видів палива не може остаточно розв'язати екологічні проблеми застосування ДВЗ, оскільки продукти згоряння все одно міститимуть шкідливі речовини. Тому останнім часом пошуки ведуться в напрямі використання відновлювальних джерел енергії. Одним з них є водень (гідроген), який вважається найперспективнішим видом палива, здатним замінити бензин і дизпаливо. Гідрогенні двигуни є екологічно чистими, оскільки продуктом згоряння в них є водяна пара, яка не спричиняє шкідливих викидів CO_2 . Крім того, гідроген згоряє в камері практично повністю в широкому діапазоні температур і тому за ефективністю використання вважається ідеальним паливом.

Екологічні проблеми використання теплових машин не обмежуються лише їхнім конструктивним удосконаленням з метою зменшення шкідливих викидів. Важливим є також відновлення енергетичних запасів, які витрачаються в процесі людської діяльності. Адже корисні копалини утворюються природою впродовж віків, а витрачаються практично миттєво. Їх запаси не безмежні і вимагають раціонального використання. В Україні основним джерелом енергоресурсів (83,4 %) залишаються теплові електростанції, що працюють на вугіллі, нафті або газі. Частка атомної енергетики складає 16,1 %; менше 1 % складають відновлювальні джерела енергії. Світові тенденції розвитку енергетики вказують на те, що в життєдіяльності людини треба шукати альтернативні джерела, які ґрунтуються на відтворюваних природних ресурсах: воді, сонці, вітрові тощо.

Не менш важливою залишається проблема утилізації відходів життєдіяльності людини, економічного використання енергоресурсів. Нині особливо гостро постає проблема утилі-

зації побутових відходів, можливість одержання енергії внаслідок екологічно «чистого» спалювання сміття. Це стає важливим не лише для великих міст, але й для малих селищ і містечок. Адже планета Земля – це єдиний наш дім. Ми живемо на різних континентах, у різних містах і селах. Але цей глобальний світ взаємопов'язаний насамперед екологічними проблемами, оскільки порушення динамічної рівноваги в одній його частині неодмінно дається взнаки природними катаклізмами на всій планеті.

1. Чому викиди діоксиду карбону в атмосферу шкідливі?
2. Чому необхідно вдосконалювати ДВЗ?
3. Які пошуки інженерів ведуться останнім часом в автомобілебудуванні?
4. Чому екологічні проблеми є загальнолюдськими?



Головне в розділі 4

199

Перебіг теплових явищ і процесів у природі відбувається за певними законами, які людство пізнавало впродовж своєї багатовікової історії.

- Тепловий стан тіл визначає температура, яка характеризує середню кінетичну енергію хаотичного руху атомів і молекул. Температуру тіл вимірюють за допомогою термометрів, які можуть бути проградуйовані за різними шкалами. Однією з найпоширеніших є шкала Цельсія, за якою 0°C відповідає температурі танення льоду, а 100°C – температурі кипіння води за нормального атмосферного тиску (760 мм рт. ст.). Одиницею температури в Міжнародній системі одиниць є кельвін (позначається K), який за розміром дорівнює градусу Цельсія (позначається $^{\circ}\text{C}$).

- Перебіг теплових явищ і процесів завжди відбувається таким чином, що більш нагріті тіла віддають теплоту менш нагрітим і з часом їхні температури вирівнюються.

- Внутрішня енергія тіла зумовлена тепловим рухом і взаємодією атомів і молекул, з яких воно складається. Її можна змінити двома способами: за рахунок виконання роботи або внаслідок теплопередачі. У природі мають місце три види теплопередачі – теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.

- Наслідками теплообміну між тілами може бути: підвищення або зниження їх температури, зміна агрегатного стану речовини або виконання механічної роботи.

- Теплові процеси характеризуються кількістю теплоти, переданою тілу. Кількість теплоти, надана тілу, визначається

його теплоємністю і зміною температури: $Q = C\Delta t$. Теплоємність тіла дорівнює добутку питомої теплоємності речовини на масу тіла, тобто $C = cm$. Звідси в загальному випадку кількість теплоти визначається за формулою: $Q = cm\Delta t$.

- У теплообмінних процесах справджується умова теплового балансу: сума кількостей теплот, яку отримали тіла внаслідок теплообміну, дорівнює сумі кількостей теплот, яку віддали інші тіла, що перебували в теплообміні.

- Під час горіння речовини виявляють різну теплотворну здатність, яка характеризується питомою теплотою згоряння палива. Кількість теплоти, що при цьому виділяється, дорівнює добутку питомої теплоти згоряння палива на його масу: $Q = qm$. Коефіцієнт корисної дії (ККД) нагрівника визначається у відсотках як відношення кількості теплоти Q_k , що пішла на нагрівання, до повної кількості теплоти Q , отриманої під час згоряння палива:

$$\text{ККД} = \frac{Q_k}{Q} \cdot 100\%.$$

200

- Зміну агрегатних станів речовини визначають теплові процеси, які супроводжуються поглинанням або виділенням певної кількості теплоти. Так, під час плавлення або кристалізації твердих тіл, які відбуваються за певної температури, кількість теплоти дорівнює добутку питомої теплоти плавлення на масу тіла: $Q = \lambda m$. Кількість теплоти під час випаровування чи конденсації рідин визначається добутком питомої теплоти пароутворення на їх масу: $Q = rm$.

- Для перетворення теплової енергії в механічну створено теплові машини, які конструктивно складаються з джерела теплової енергії (нагрівника), робочого тіла, яке перетворює отриману теплоту Q_1 в механічну роботу A , і охолоджувача, якому робоче тіло передає невикористану частину теплової енергії Q_2 . Теплові машини характеризуються коефіцієнтом корисної дії:

$$\text{ККД} = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

який завжди менший за 1.

- В основу принципу дії теплових машин покладено фундаментальні закони природи, зокрема закон збереження і перетворення енергії, який заперечує можливість такого теплового процесу, єдиним результатом якого було б виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплової енергії без змін в оточуючому середовищі. Це означає, що не можна створити так званий вічний двигун, який би перетворив усю надану йому теплову енергію в роботу.

Алфавітний покажчик

А

Абсолютна шкала температур 155
Аеростат 120
Анероїд 107
Архімед 72
Атмосфера 102
Атмосферний тиск 102
Атмосферний тиск, вимірювання 102

Б

Барометр 105
– ртутний 105
Батискаф 98
Батисфера 97
Блок нерухомий 77
– рухомий 78
Больцман Л. 157

В

Вага 61
Важіль 68
Вантажопідйомність 117
Ват 145
Ватерлінія 117
Вимірювання атмосферного тиску 105
– маси 50
Випаровування 182
Відносність кінетичної енергії 138
– руху 6
– форми траєкторії 13
– швидкості 17
Вічний двигун 192
Внутрішня енергія тіла 157
Водогін 100
Водотоннажність 117
Всесвітнє тяжіння 55

Г

Газова турбіна 195
Галілей Г. 18
Геріке О. 103
Герц Г. 31
Гідравлічна машина 91
Годинник 8
Гравітаційна взаємодія 56
Градус Цельсія 154
Градування шкали 59
Графік енергії 138
– зміни агрегатного стану речовини 188
– механічного руху 19
Графічне зображення сили 46
– швидкості 19
Густина 51

Д

Двигун внутрішнього згоряння 193
Деформація 57
Джоуль Дж. 128
Динамометр 45
Дирижабль 119
Додавання сил 46
Домкрат 83
Дослід **Геріке** 103
– **Паскаля** 96
– **Торрічеллі** 104

Е

Енергія кінетична 137
– потенціальна 135

З

Закон **Архімеда** 109
– всесвітнього тяжіння 56
– **Гука** 58

- збереження і перетворення енергії 140
- Паскаля 88
- «Золоте правило» механіки 130

I

- Інертність 49
- Інерція 48

K

- Калориметр 166
- Калориметричний метод 166
- Карно С.** 192
- Кельвін 155
- Кипіння 183
- Кількість теплоти 164
- ККД нагрівника 173
- Коливання 34
- Конвекція 161
- Конденсація 182

M

- Майєр Р.** 142
- Максвелл Дж.** 157
- Маса 48
- Матеріальна точка 10
- Маятник 32
 - математичний 32
- Механічна робота 127
- Механічний рух 5
- Міжнародний еталон кілограма 50
- Момент сили 71

N

- Невагомість 63
- Ньютон І.** 45

O

- Одиниці густини 52
 - енергії 135
 - кратні 15
 - маси 50
 - моменту сили 71

- потужності 145
- роботи 128
- сили 45
- температури 155
- тиску 85
- тиску атмосферного 106
- частинні 15
- часу 9
- швидкості 17
- шляху 15
- Осадка 117

П

- Парова турбіна 195
- Паскаль** 86
- Передавання тиску 90
 - газами 90
 - рідинами 90
- Період коливань 30
- Питома теплоємність речовини 165
- Питома теплота згоряння палива 173
 - пароутворення 182
 - плавлення 177
- Підіймальна сила в газі 118
- Підшипники кулькові 67
 - роликові 67
- Плавання суден 117
 - тіл 111
- Плавлення твердих тіл 176
- Плече сили 70
- Повітроплавання 118
- Потужність 114
- Похила площина 81
- Прості механізми 68, 77

P

- Рівняння теплового балансу 168
- Рідинний насос 94
- Робота корисна 132
 - механічна 127
 - сили тяжіння 55
- Рух криволінійний 26
 - механічний 6
 - нерівномірний 19
 - обертальний 27

- поступальний 10
- прямолінійний 10
- рівномірний 19

С

Сила 43

- Архімеда 110
- виштовхувальна 110
- підймальна 119
- пружності 57
- рівнодійна 47
- тертя 64
- тиску 85
- тяжіння 55

Сполучені посудини 99

Сублімація 182

Т

Тверднення 178

Температура кипіння 183

- плавлення 177
- тіла 153

Температурна шкала

Цельсія 153

Теплове випромінювання 163

Тепловий баланс 167

- рух 157
- стан тіла 151

Теплоємність тіла 164

Теплообмін 151

Теплопередача 160

Теплопровідність 163

Теплота згоряння палива 173

Терези 50

Термометр 153

Тертя ковзання 65

- кочення 65

Тиск 84

- атмосферний 106
- газу 89
- нормальний атмосферний 104
- рідини 88

Томсон В., лорд Кельвін 155

Торрічеллі Е. 104

Точка прикладання ваги 61

- прикладання сили
- тяжіння 55

Траєкторія 11

Тяжіння 55

У

Уатт Дж. 145

Ц

Цельсій А. 153

Ціна поділки 59

Ч

Частота 31

- коливань 31
- обертання 28

Ш

Швидкість 15

- середня 21

Шкала 59

Шлюзи 100

Шлях 14

Вправа 4. 4. 2460 км; 5. 100 с; 6. 1,2 с; 7. 20 м/с.

Вправа 7. 2. 730 кг/м³; 3. 800 кг/м³; 5. 2,85 кг; 6. 5850 кг; 7. 48 т;
8. 100 л; 10. У 17 разів.

Вправа 8. 2. 5 кг.

Вправа 9. 3. 0,3 м; 4. 112 мм.

Вправа 10. 1. 19,6 Н; 2. 686 Н; 0.

Вправа 11. 1. 20 Н; 2. 2,45 Н; 3. 12 см; 6. 25 см від правого кінця.

Вправа 12. 2. 53 Н; 3. 420 Н.

Вправа 14. 3. 392 кПа; 4. 49 кПа; 5. 196 кПа; 6. 4898 кг;
7. 150 000 МПа.

Вправа 15. 1. 210 кПа; 3. 200 кПа.

Вправа 16. 1. 20 кН; 2. 0,2 Н; 3. 6 см².

Вправа 17. 1. 1764 Па; 2. 735 кПа; 3. 908,46 кПа; 4. 4083 м;
5. 613,24 м; 6. 74 480 Па; 21,6 МН.

Вправа 18. 3. 0,6 м; 4. 0,625 м.

Вправа 19. 1. 106,6 кПа; 66,64 кПа; 70,6 кПа. 2. 675 мм; 825 мм;
728 мм; 3. 10,36 м; 4. 6,8 м.

Вправа 20. 2. 48 м.

Вправа 21. 6. 8,5 Н; 7. 2,16 кН; 8. 3,8 кН; 9. 0,005 м³; 10. 2,013 кН;
11. 1,96 Н.

Вправа 22. 4. 4,9 Н; 6. Потоне; 9. Зменшилася; 10. 811,44 МН;
80 388 м³; 11. 38,8 МН.

Вправа 23. 1. 3,8 кН; 2. 87,024 Н; 3. 0,004 Н; 4. 0,042 Н;
6. 10066,7 Н.

Вправа 24. 4. 1 Дж; 5. 980 кДж; 6. 6 кДж; 7. 300 Дж.

Вправа 25. 1. 90,7 %; 2. 91,9 %; 3. 30,9 кг; 4. 3,92 кДж; 5. 490 Н;
6. 245 Н; 1,2 м; 7. 73,5 %.

Вправа 26. 2. 1,53 м; 3. 156,8 кН.

Вправа 27. 5. 625 Дж; 6. 20 м/с; 7. 100 т.

Вправа 28. 4. 196 Дж; 98 Дж; 5. 70,56 кДж.

Вправа 29. 1. 0,0001 Вт; 2. 24,5 кВт; 3. 3,06 Вт; 4. 14,7 кВт;
5. 2 м/с; 5 м/с; 6. 120 км; 9. 2400 с; 10. 4 МВт; 11. 2,5 кДж;
12. 39,22 с.

Вправа 31. 1. 135 Дж/К; 2. 0,4 кг; 3. $c = 380 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$; це мідь;
4. 110 К; 5. 894 кДж; 6. 8 МДж; 7. 40 °С; 50,4 кДж; 8. 20 г;
9. 12 °С.

Вправа 32. 1. 370 кг; 2. 5,5 кг; 3. 14 г; 4. 30 °С; 5. 40 %.

Вправа 33. 1. 530 кДж; 2. 194 кДж; 3. 1200 кДж; 4. 0,275 кг;
5. 0,26 кг.

Вправа 34. 1. 77,4 кДж; 2. 13 г; 3. 7,5 °С; 4. Ні.

Вправа 35. 1. 15 кг; 2. 30 %.

Дорогий друже!	3
----------------------	---

Розділ 1. МЕХАНІЧНИЙ РУХ

§ 1. Механічний рух і простір. Відносність руху	5
Вправа 1	7
§ 2. Механічний рух і час	8
§ 3. Фізичне тіло і матеріальна точка	10
§ 4. Траєкторія руху тіла	11
§ 5. Шлях, який проходить тіло	14
§ 6. Швидкість руху тіла	15
Вправа 2	20
§ 7. Середня швидкість	21
Вправа 3	23
<i>Лабораторна робота № 1. Вимірювання середньої швидкості тіла</i>	24
§ 8. Рух точки по колу	25
§ 9. Обертання твердого тіла	27
Вправа 4	28
<i>Лабораторна робота № 2. Вимірювання періоду і частоти обертання твердого тіла</i>	29
§ 10. Коливальний рух. Амплітуда, період і частота коливань ...	30
§ 11. Фізичний та математичний маятники	32
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження коливань нитяного маятника</i>	33
§ 12. Звукові і ультразвукові коливання та їх застосування	34
<i>Лабораторна робота № 4. Вивчення характеристик звуку</i>	40
<i>Головне в розділі 1</i>	41

205

Розділ 2. ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ

§ 13. Взаємодія тіл. Сила	43
Вправа 5	48
§ 14. Інертність тіл. Маса	48
Вправа 6	51
§ 15. Густина речовини	51
Вправа 7	54
§ 16. Сила тяжіння	55
Вправа 8	56
§ 17. Деформація тіл	57
<i>Лабораторна робота № 5. Градування шкали динамометра</i> ...	59
Вправа 9	60
§ 18. Вага тіла	61
Вправа 10	63
§ 19. Сила тертя	64

☞ § 20. Як враховують сили тертя	65
<i>Лабораторна робота № 6. Вимірювання коефіцієнта тертя</i>	67
§ 21. Важіль	68
☞ § 22. Де застосовуються важелі	71
<i>Лабораторна робота № 7. Дослідження властивостей важеля</i> ..	74
Вправа 11	76
§ 23. Блоки	77
<i>Лабораторна робота № 8. Вивчення блоків</i>	80
Вправа 12	81
☞ § 24. Похила площина	81
Вправа 13	83
§ 25. Механічний тиск	84
§ 26. Як враховують тиск	87
Вправа 14	88
§ 27. Тиск газів і рідин. Закон Паскаля	88
Вправа 15	91
§ 28. Гідравлічна машина	91
☞ § 29. Застосування гідравлічної машини в техніці	92
Вправа 16	94
§ 30. Ваговий тиск рідин	94
☞ § 31. Як людина досліджує водні глибини	97
Вправа 17	98
§ 32. Сполучені посудини	99
☞ § 33. Застосування сполучених посудин	100
Вправа 18	101
§ 34. Атмосферний тиск. Дослід Торрічеллі	102
Вправа 19	105
§ 35. Барометри	105
Вправа 20	107
☞ § 36. Рідинний поршневий насос	107
§ 37. Виштовхувальна сила. Закон Архімеда	109
Вправа 21	111
§ 38. Умови плавання тіл	111
<i>Лабораторна робота № 9. З'ясування умов плавання тіл</i>	114
Вправа 22	116
☞ § 39. Плавання суден	117
☞ § 40. Повітроплавання	118
<i>Лабораторна робота № 10. Зважування тіл гідростатичним методом</i>	121
Вправа 23	124
<i>Головне в розділі 2</i>	125

Розділ 3. РОБОТА Й ЕНЕРГІЯ. ПОТУЖНІСТЬ

§ 41. Механічна робота	127
Вправа 24	129
§ 42. «Золоте правило» механіки	130
<i>Лабораторна робота № 11. Визначення ККД похилої площини</i> ...	133
Вправа 25	134
§ 43. Потенціальна енергія	135

Вправа 26	137
§ 44. Кінетична енергія	137
Вправа 27	139
§ 45. Закон збереження і перетворення енергії	140
☞ § 46. Використання закону збереження і перетворення енергії	142
Вправа 28	144
§ 47. Потужність	144
Вправа 29	147
<i>Головне в розділі 3</i>	149

Розділ 4. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОВІ МАШИНИ

§ 48. Тепловий стан тіл. Теплообмін	151
§ 49. Температура тіл. Вимірювання температури тіла	153
<i>Лабораторна робота № 12. Вимірювання температури за допомогою різних термометрів</i>	155
§ 50. Внутрішня енергія тіла. Два способи зміни внутрішньої енергії	157
§ 51. Види теплопередачі	160
Вправа 30	163
§ 52. Кількість теплоти. Питома теплоємність речовини	164
<i>Лабораторна робота № 13. Визначення питомої теплоємності речовини</i>	166
§ 53. Тепловий баланс	167
<i>Лабораторна робота № 14. Порівняння кількості теплоти при змішуванні води різної температури</i>	171
Вправа 31	172
§ 54. Теплота згоряння палива. ККД нагрівника	173
Вправа 32	175
<i>Лабораторна робота № 15. Визначення ККД нагрівника</i>	175
§ 55. Плавлення твердих тіл. Кристалізація	176
§ 56. Приклади розв'язування задач	179
Вправа 33	181
§ 57. Випаровування і конденсація рідин	182
§ 58. Приклади розв'язування задач	185
Вправа 34	187
§ 59. Пояснення зміни агрегатних станів речовини на основі атомно-молекулярного вчення	187
§ 60. Перетворення теплової енергії в механічну. Принцип дії теплових машин	190
Вправа 35	193
§ 61. Двигун внутрішнього згоряння	193
§ 62. Парова і газова турбіни	195
§ 63. Екологічні проблеми використання теплових машин	196
<i>Головне в розділі 4</i>	199
Алфавітний покажчик	201
Відповіді до вправ	204