

Міністерство освіти України  
Київський міжнародний університет цивільної авіації

С.М. Пастушенко

# ФІЗИКА

Визначення, закони, формули

*Довідник для учнів*

Книжка перша  
Механіка. Молекулярна фізика

*Рекомендовано Міністерством освіти України*

КМУЦА  
Діал  
1996

ББК 22.3я72  
П196  
УДК 53(07)

Рецензенти:

канд. фіз.-мат. наук, доц. *В.М. Кулішенко*  
(Київський міжнародний університет цивільної авіації)  
вчитель-методист *К.О. Дмитренко*  
(середня школа № 245 м. Києва)

Пастушенко С.М.

П28 Фізика. Визначення, закони, формули. Довідник для учнів. Книжка перша. Механіка. Молекулярна фізика: Навч. посібник - Київ: КМУЦА, Діал, 1996. - 136 с.: іл. 114.

ISBN 5-7707-8529-2

У навчальному посібнику подано стислий систематичний виклад основного змісту шкільного курсу фізики з 7 до 10 класу. Посібник містить усі визначення, закони, формули курсу фізики середньої школи. Докладніше, ніж у довідковій літературі, висвітлено окремі складні питання шкільної програми.

Розраховано на учнів середніх шкіл, ліцеїв, гімназій, слухачів підготовчих відділень та курсів вузів. Видання зацікавить викладачів фізики середніх навчальних закладів, а також студентів коледжів та вузів.

П 4308000000 - 004  
210 - 96

ББК 22.3я72

ISBN 5-7707-8529-2

© С.М.Пастушенко, 1996

*Від автора*

*Пропоноване видання дасть змогу повторити основні питання шкільної програми з фізики тому, хто готується до випускних іспитів у школі і до вступу у вузи. Перша книжка довідкового посібника складається з двох частин – механіки і молекулярної фізики, в яких подано відповідний матеріал шкільної програми, що вивчається з 7 до 10 класу.*

*Досвід приймання вступних іспитів до вузів засвідчує, що окремі питання є традиційно складними для учнів, тому вони висвітлені у посібнику докладніше, тоді як інші подано стисло і лаконічно.*

*Складаючи цю книжку, автор користувався як довідковою літературою, так і шкільними підручниками та посібниками з фізики, зокрема новими посібниками Гончаренка С. У. для ліцеїв і класів природничо-наукового профілю.*

*Автор висловлює подяку вчителям фізики середніх шкіл, які внесли низку вагомих зауважень щодо розширення змісту і вдосконалення подачі матеріалу під час підготовки рукопису до видання. Серед них вчителі київської школи-ліцею № 157 Любченко М. Г. та Ушаков А. В., а також чернівецької школи № 3 Стратійчук О. А.*

*Поради та пропозиції щодо подальшого удосконалення посібника просимо надсилати на адресу:*

*254205 Київ-205, а/с 319/3, НВП "Діал"*

## Вступ

Фізика вивчає найпростіші й водночас найзагальніші закономірності явищ природи і будови матерії. Для кількісної і якісної характеристики фізичних явищ та об'єктів використовують поняття *фізична величина*.

У Міжнародній системі одиниць (скорочено СІ – система інтернаціональна) за *основні* одиниці прийняті: одиниця довжини – *метр*, часу – *секунда*, маси – *кілограм*, сили струму – *ампер*, температури – *кельвін*, сили світла – *кандела*, кількості речовини – *моль*. *Похідні* одиниці встановлюють за допомогою основних одиниць, користуючись рівняннями, що виражають зв'язок між ними. Похідні одиниці є добутком степенів основних одиниць. Наприклад, одиниця прискорення – метр на секунду в квадраті:  $1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Деякі похідні одиниці названі на честь вчених. Такі одиниці пишуть з великої літери, як-от: одиниця сили – ньютон (Н), одиниця потужності – ват (Вт).

Для вираження дуже великих або дуже малих значень величин у СІ застосовують десяткові *кратні* або *часткові* одиниці. При цьому перед назвою величини пишуть відповідний префікс. Наприклад, мм – міліметр – часткова одиниця, МДж – мегаджоуль – кратна одиниця. Наведемо таблицю деяких десяткових префіксів до назв величин:

М – мега ( $10^6$ )	д – деци ( $10^{-1}$ )	мк – мікро ( $10^{-6}$ )
к – кіло ( $10^3$ )	с – санти ( $10^{-2}$ )	н – нано ( $10^{-9}$ )
г – гекто ( $10^2$ )	м – мілі ( $10^{-3}$ )	п – піко ( $10^{-12}$ )

## Частина 1. Механіка

### Розділ 1. Кінематика

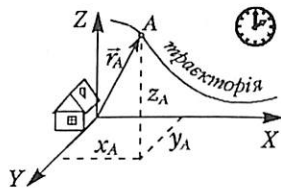
#### Основне завдання механіки. Система відліку

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

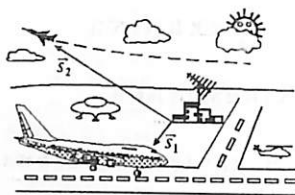
*Механічний рух* тіла – це зміна з часом його положення відносно інших тіл. Під *взаємодією* в механіці розуміють ті дії тіл одне на одне, результатом яких є зміна руху цих тіл або їхні деформації.

*Основне завдання механіки* – визначення положення рухомого тіла в будь-який момент часу. Щоб встановити положення тіла, слід знати його координати. Для цього спочатку слід вибрати *тіло відліку* і пов'язати з ним *систему координат*. В механіці часто тілом відліку вибирають нерухоме тіло на поверхні Землі, з яким пов'язують прямокутну декартову систему координат (мал. 1). Для визначення положення рухомого тіла в будь-який момент часу необхідно також встановити початок відліку часу.

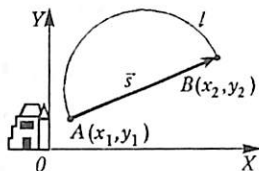
Тіло відліку, пов'язану з ним систему координат і відлік часу називають *системою відліку*.



Мал. 1



Мал. 2



Мал. 3

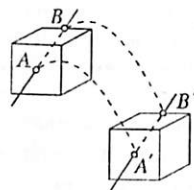
### Кінематичні характеристики

*Кінематика* – розділ механіки, який вивчає геометричні властивості руху без урахування причин, що зумовили його.

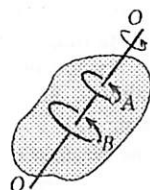
*Матеріальною точкою* називають поняття для позначення тіла, розмірами якого за даних обставин руху можна нехтувати. Тіло розглядатиметься як матеріальна точка, якщо розміри його малі порівняно з відстанню, яку воно проходить, або відстанями від нього до інших тіл. Наприклад, літак під час польоту можна вважати матеріальною точкою, але не тоді, коли він рухається по злітно-посадочній смузі аеродрому (мал. 2). В останньому випадку слід враховувати габарити літака – довжину, розміри крил та ін.

*Траєкторія* – неперервна лінія, яку описує рухома матеріальна точка в обраній системі відліку (мал. 1 – 3). Залежно від форми траєкторії розрізняють *прямолінійний* і *криволінійний* рухи матеріальної точки.

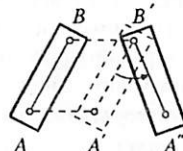
*Шлях* – це скалярна величина, що дорівнює довжині ділянки траєкторії, пройденої тілом. Шлях



Мал. 4



Мал. 5



Мал. 6

найчастіше позначають літерами  $s$  або  $l$ . Одиниця шляху – метр (м).

*Переміщення*  $\vec{s}$  – це вектор, який сполучає положення рухомої матеріальної точки на початку і наприкінці певного інтервалу часу (мал. 3).

*Поступальним рухом* називають рух, під час якого всі точки тіла описують однакові траєкторії. Щоб описати поступальний рух тіла, досить взяти одну його точку і розглянути її рух (мал. 4).

*Обертальний рух* – це рух, коли всі точки тіла описують кола в паралельних площинах, перпендикулярних прямій, на якій лежать центри цих кіл. Така пряма зветься *віссю обертання* (мал. 5). Протяжне тіло, що обертається, не можна вважати матеріальною точкою, якщо розглядається його рух відносно тіл, що розташовані поблизу. Будь-який рух протяжного тіла можна уявити як сукупність поступального та обертального рухів (мал. 6).

### Вектори і скаляри. Дії з векторами

*Вектори і скаляри.* Векторна величина "переміщення", з якою ми щойно ознайомилися, відрізняється від скалярної величини шляхом наявності напрямку.

няється від багатьох інших фізичних величин. Визначити вектор переміщення – це не тільки задати його числове значення, а й напрям у просторі. Фізичні величини, які характеризуються як числовим значенням, так і напрямом, називають *векторними*, або *векторами*. Це переміщення  $\vec{s}$ , швидкість  $\vec{v}$ , сила  $\vec{F}$ , напруженість електричного поля  $\vec{E}$  та ін. *Скалярними величинами*, або *скалярами*, називають такі величини, які мають тільки числові значення (наприклад, температура  $T$ , маса  $m$ , час  $t$  та ін.)

**Додавання векторів** проводять тоді, коли слід замінити кілька векторів одним, який діє так само, як всі вектори-доданки разом.

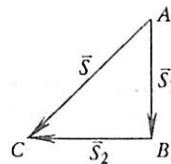
Скажімо, людина проходить 10 метрів на південь, а потім 10 метрів на захід. Позначимо відповідні вектори переміщення літерами  $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$  (мал. 7). Увесь шлях від точки А до точки С:

$$s_{ABC} = s_1 + s_2 = 20 \text{ м.}$$

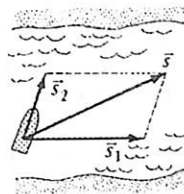
Переміщення  $\vec{s}$  від А до С за модулем буде менше від пройденого шляху:  $s < s_{ABC}$ . З малюнка 7 видно, що

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} = \sqrt{2s_1^2} = \sqrt{2}s_1 \approx 14,1 \text{ м.}$$

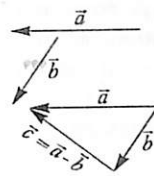
Спосіб додавання векторів, показаний на малюнку 7, називають *правилом трикутника*, за яким для додавання вектора  $\vec{s}_1$  до вектора  $\vec{s}_2$  слід кінець першого вектора сполучити з початком другого. В цьому випадку векторною сумою буде



Мал. 7



Мал. 8



Мал. 9

закриваючий вектор  $\vec{s}$ , який з'єднує початок вектора  $\vec{s}_1$  та кінець вектора  $\vec{s}_2$ .

Інший спосіб додавання векторів (*правило паралелограма*) ілюструє малюнок 8, на якому зображено моторний човен, що рухається під кутом до течії річки. Бачимо, що *сума векторів*  $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$  – це вектор  $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ , що зображується діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах  $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$ . Напрямок цього вектора збігається з напрямком діагоналлю паралелограма, а модуль  $s$  визначають за допомогою теореми косинусів:

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + 2s_1s_2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – кут між напрямками векторів  $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$ ;  $s_1, s_2$  – модулі векторів-доданків:  $s_1 = |\vec{s}_1|, s_2 = |\vec{s}_2|$ .

**Віднімання векторів** – це додавання, при якому до першого вектора додається вектор, протилежний другому:  $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$ . Віднімання векторів можна здійснити за правилом трикутника (мал. 9). Для цього вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  розміщують так,

щоб вони виходили з однієї точки, і сполучають кінець вектора  $\vec{b}$  з кінцем вектора  $\vec{a}$ . Це і буде вектор різниці  $\vec{c}$ , спрямований в бік зменшуваного, тобто в бік вектора  $\vec{a}$ :  $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ . З малюнка видно, що сума векторів  $\vec{b}$  і  $\vec{c}$  дорівнює вектору  $\vec{a}$ :  $\vec{b} + \vec{c} = \vec{a}$ .

Якщо на векторах  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , які виходять з однієї точки, побудований паралелограм, то вектор суми  $(\vec{a} + \vec{b})$  збігається з однією діагоналлю цього паралелограма, а вектор різниці  $(\vec{a} - \vec{b})$  – з другою діагоналлю (мал. 10).

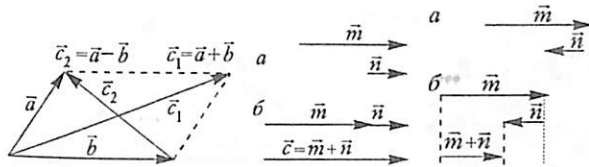
**Колінеарні вектори** – це вектори, напрямлені вздовж однієї прямої або паралельні один одному. Вони можуть бути спрямовані в один бік чи в протилежні боки (мал. 11а і мал.12а).

**Додавання колінеарних векторів** пояснюється на малюнках 11 і 12. Якщо вектори напрямлені в один бік, вектор їх суми спрямований в бік векторів-доданків, а модуль результуючого вектора (вектора суми) дорівнює арифметичній сумі модулів векторів (мал. 11б):

$$|\vec{c}| = |\vec{m}| + |\vec{n}|.$$

Якщо ж вектори, що додаються один до одного, спрямовані в протилежні боки, вектор суми спрямований в бік більшого за модулем вектора-доданка, а модуль вектора суми дорівнює арифметичній різниці модулів векторів-доданків (мал. 12б):

$$|\vec{c}| = |\vec{m}| - |\vec{n}| \quad (\text{якщо } |\vec{m}| \geq |\vec{n}|).$$



Мал. 10

Мал. 11

Мал. 12

**Множення вектора на скаляр.** В результаті множення вектора  $\vec{a}$  на скаляр  $k$  маємо вектор  $k\vec{a}$ , модуль якого дорівнює  $ka$ . Напрямок вектора  $k\vec{a}$  збігається з напрямком  $\vec{a}$ , якщо  $k > 0$ , або протилежний вектору  $\vec{a}$ , якщо  $k < 0$  (мал. 13).

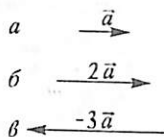
**Скалярним добутком векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$**  називають число  $c$  (скаляр), що дорівнює добутку числових значень (модулів) цих векторів і косинуса кута  $\alpha$  між ними:

$$c = \vec{a} \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \alpha = a b \cos \alpha. \quad (2)$$

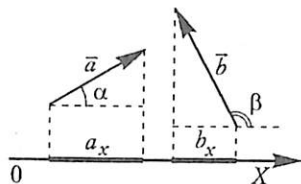
Якщо кут  $\alpha$  гострий, скалярний добуток додатний, якщо тупий – від'ємний.

### Проекції вектора. Розкладання вектора на складові

**Проекцією** вектора  $\vec{a}$  на вісь  $OX$  називається довжина відрізка  $a_x$  між проекціями на цю вісь початку  $A$  і кінця  $B$  вектора  $\vec{a}$ . Нагадаємо, що проекцією точки  $A$  на певну пряму називають основну перпендикуляра, що опущений з точки  $A$  на цю пряму.



Мал. 13



Мал. 14

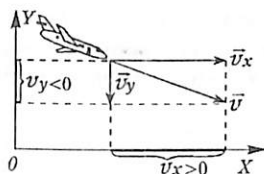
Інше визначення проекції полягає в тому, що проекцію  $a_x$  розглядають як алгебраїчну величину, котра визначається виразом:

$$a_x = a \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

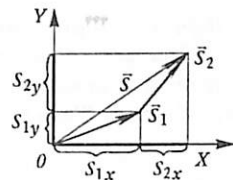
де  $a$  – модуль вектора,  $a = |\vec{a}|$ ,  $\alpha$  – кут, що відраховується від додатного напрямку координатної осі проти годинникової стрілки до напрямку вектора (мал. 14). Якщо кут  $\alpha$  гострий,  $\cos \alpha > 0$ , і проекцію беруть зі знаком плюс; у випадку ж тупого кута,  $\cos \alpha < 0$ , – проекцію записують зі знаком мінус.

Якщо напрям вектора  $\vec{a}$  збігається з напрямом осі  $OX$ , його проекція на цю вісь дорівнює модулю вектора, взятому зі знаком плюс ( $\alpha=0$ ,  $\cos \alpha=1$ ). Якщо ж вектор спрямований в бік, протилежний додатному напрямку осі  $OX$ ,  $\alpha=180^\circ$ ,  $\cos \alpha=-1$ , і проекція – від’ємна:  $a_x = -a$ , де  $a = |\vec{a}|$ .

**Розкладання вектора на складові.** На малюнку 15 показані проекції вектора швидкості  $\vec{v}$  на координатні осі  $OX$  і  $OY$ . Одна з цих проекцій додатна, друга – від’ємна. На цьому ж малюнку по-



Мал. 15



Мал. 16

казано, що вектор  $\vec{v}$  можна подати як геометричну суму двох векторів ( $\vec{v}_x$  і  $\vec{v}_y$ ), спрямованих відповідно горизонтально і вертикально:  $\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$ . В математиці така дія називається **розкладанням вектора на складові**. Розкладання вектора – це заміна його двома іншими векторами, прикладеними в одній тій самій точці, які діють так само, як і один даний вектор.

За допомогою проекцій векторів їх суми і різниці можна здобувати простими алгебраїчними обчисленнями. Так, з малюнка 16 видно, що проекція суми векторів на координатну вісь дорівнює алгебраїчній сумі проекцій векторів-доданків на цю саму вісь:

$$s_x = s_{1x} + s_{2x} ; s_y = s_{1y} + s_{2y}.$$

Отже, щоб знайти проекцію суми або різниці векторів, слід додати проекції всіх векторів, враховуючи їх знаки.

### Рівномірний прямолінійний рух

**Рівномірний прямолінійний рух** – рух, під час якого точка за будь-які однакові інтервали часу здійснює однакові переміщення.

Швидкість рівномірного прямолінійного руху – постійна векторна величина  $\vec{v}$ , що дорівнює відношенню переміщення тіла  $\vec{s}$  до часу  $t$ , за який це переміщення відбулося:

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

Вектор швидкості прямолінійного руху спрямований в бік переміщення і чисельно дорівнює переміщено тіла за одиницю часу. Одиниця швидкості – метр за секунду (м/с).

Під час рівномірного прямолінійного руху пройдений тілом шлях  $s$  дорівнює модулю переміщення:  $s = |\vec{s}|$ ; цей шлях прямо пропорційний часу руху  $t$ :

$$s = vt.$$

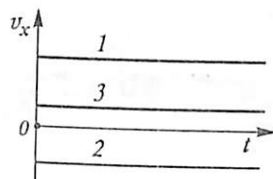
Якщо тіло рухається вздовж осі  $OX$ , його координату  $x$  в будь-який момент часу руху  $t$  можна обчислити за допомогою рівняння рівномірного прямолінійного руху:

$$x = x_0 + v_x t, \quad (4)$$

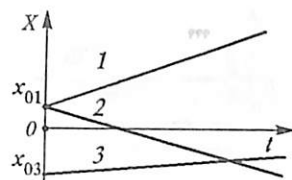
де  $x_0$  – координата тіла в момент часу  $t=0$  (початкова координата);  $v_x$  – проекція вектора швидкості на вісь  $OX$ . Оскільки з рівняння (4) ми можемо визначити положення рухомого тіла в будь-який момент часу, то воно забезпечує розв'язання основної задачі механіки. Якщо позначити модуль вектора швидкості  $|\vec{v}| = v$ , рівняння (4) можна записати так:

$$x = x_0 \pm vt, \quad (5)$$

Це рівняння зручно використовувати під час роз-



Мал. 17



Мал. 18

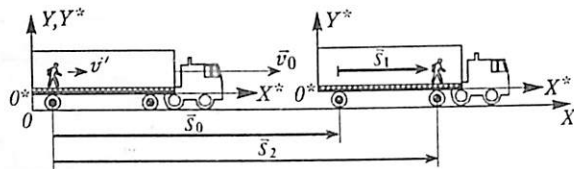
в'язування задач, але при цьому слід пам'ятати, що значення  $x_0$  може бути як додатним, так і від'ємним, а модуль швидкості завжди додатний,  $v > 0$ . Знак плюс в (5) відповідає рухові в додатному напрямі осі  $OX$  (прямі 1 і 3 на мал. 17 і 18), знак мінус – у від'ємному (прямі 2).

## Відносність руху

Відносність руху полягає в тому, що рух одного й того самого тіла по-різному описується в різних системах відліку. Траєкторія руху тіла, шлях, переміщення і швидкість залежать від вибору системи відліку, тобто механічний рух в і д н о с н и й. Так, відносним буде рух людини в різних системах відліку, зображених на мал. 19: переміщення  $\vec{s}'$  і швидкість  $\vec{v}'$  людини щодо автомобіля менші, ніж переміщення  $\vec{s}$  і швидкість  $\vec{v}$  щодо Землі. Переміщення  $\vec{s}$  людини щодо Землі за малий інтервал часу  $t$  дорівнює сумі переміщень за цей інтервал часу автофургона відносно Землі ( $\vec{s}_0$ ) і людини щодо автомобіля ( $\vec{s}'$ ) (мал. 19):

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}', \quad \text{або} \quad \vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{v}' t.$$





Мал. 19

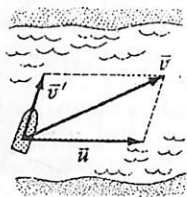
Звідси швидкість людини відносно Землі  $\bar{v} = \bar{s}/t$ , або

$$\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{v}' \quad (6)$$

Рівняння (6) виражає класичний закон додавання швидкостей:

швидкість тіла  $\bar{v}$  в нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла  $\bar{v}'$  в рухомій системі відліку і швидкості  $\bar{v}_0$  рухомої системи щодо нерухомої.

Закон, виражений формулою (6), справедливий для будь-яких напрямів векторів швидкості  $\bar{v}'$  і  $\bar{v}_0$ . На мал. 20 зображений човен, що перетинає річку, розвиваючи відносно води швидкість  $\bar{v}'$ . Якщо швидкість



Мал. 20

течії  $\bar{v}_0$ , то швидкість човна відносно берега  $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{v}'$ . В цьому випадку нерухому систему координат пов'язують з берегом, рухому — з водою, що тече, а відносною швидкістю систем відліку є швидкість течії  $\bar{v}_0$ .

## Середня і миттєва швидкість

Середньою швидкістю нерівномірного руху називають величину, яка дорівнює відношенню всього переміщення, здійсненого тілом, до всього часу руху:

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

Якщо тіло за послідовні інтервали часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$  проходить відповідні переміщення  $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_n$ , то середню швидкість за весь час руху визначають за формулою:

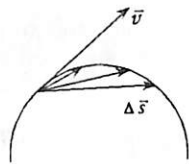
$$\bar{v}_c = \frac{\bar{s}_1 + \bar{s}_2 + \dots + \bar{s}_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Під час нерівномірного руху швидкість тіла змінюється з часом. Якщо за інтервал часу  $\Delta t$  переміщення точки дорівнює  $\Delta \bar{s}$  (мал. 21), тоді відношення  $\Delta \bar{s}$  до  $\Delta t$  визначає середню швидкість за цей час:

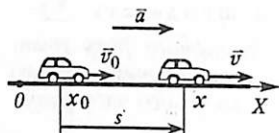
$$\bar{v}_c = \frac{\Delta \bar{s}}{\Delta t}$$

Якщо послідовно зменшувати інтервал часу  $\Delta t$ , напрям вектора переміщення  $\Delta \bar{s}$  наближається до дотичної в точці А траєкторії руху, через яку проходить тіло в момент часу  $t$  (мал. 21). Тому вектор швидкості  $\bar{v}$  лежить на дотичній до траєкторії руху тіла в точці А і напрямлений в бік руху тіла.

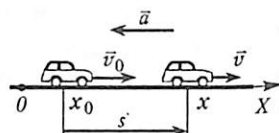
Швидкість тіла в даний момент часу в певній точці траєкторії називають миттєвою швидкістю.



Мал. 21



Мал. 22



Мал. 23

### Рівноприскорений прямолінійний рух

*Рівноприскорений прямолінійний рух* – рух, під час якого швидкість тіла за рівні інтервали часу змінюється однаково.

*Прискорення* – векторна величина, що дорівнює відношенню вектора зміни швидкості ( $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ ) до інтервалу часу ( $\Delta t = t - t_0$ ), за який ця зміна відбулася:

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

Прискорення характеризує зміну швидкості за одиницю часу. Одиниця прискорення – метр на секунду в квадраті ( $\text{м/с}^2$ ).

Якщо відлік часу вести з моменту  $t_0 = 0$ , то

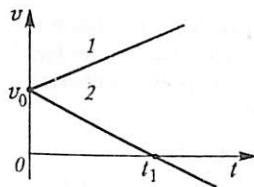
$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Відповідно до цієї формули значення вектора миттєвої швидкості в момент часу  $t$  дорівнює

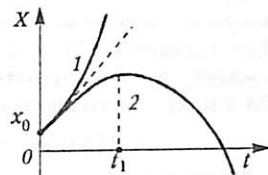
$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

а в проекціях на вісь  $OX$

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



Мал. 24



Мал. 25

Для рівноприскореного руху в додатному напрямі осі  $OX$ , якщо  $v_x = v$ ,  $v_{0x} = v_0$ , справедливі формули:

$$v = v_0 \pm at; \quad (7)$$

$$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2};$$

$$x = x_0 + v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad (8)$$

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{\pm 2a}.$$

Тут  $a = |\vec{a}|$ , а знаки плюс і мінус відповідають випадкам, зазначеним на мал. 22 і 23, коли тіло, рухаючись у напрямі осі  $OX$ , збільшує або зменшує швидкість руху.

*Графік зміни швидкості з часом для рівноприскореного руху* подано на мал. 24: пряма 1 – модуль швидкості збільшується; пряма 2 – модуль швидкості зменшується (до моменту часу  $t_1$ ).

*Графік зміни координати  $x$  для рівноприскореного руху* наведено на мал. 25: парабола 1 – швидкість за модулем збільшується; парабола 2 – швидкість за

модулем зменшується до моменту часу  $t_1$ ; при  $t = t_1$  тіло зупиняється,  $v = 0$ . Хід параболи 2 при  $t > t_1$  показує, що тіло рухається у від'ємному напрямі осі  $OX$  і модуль його швидкості збільшується.

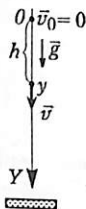
### Вільне падіння тіл

*Вільним падінням* називають рух тіла із стану спокою в безповітряному просторі під дією лише сили тяжіння. Спостереження свідчать, що такий рух — рівноприскорений. Значення *прискорення вільного падіння* (його позначають літерою  $g$ ) однакове для тіл будь-яких розмірів та маси:

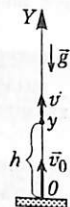
$a = g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ . Падіння тіл близько поверхні Землі можна вважати вільним падінням, якщо сила опору повітря незначна і нею можна нехтувати.

Оскільки під час вільного падіння тіло рухається вниз, доцільно початок координатої осі  $OY$  поєднати з початковим положенням тіла і спрямувати вісь в напрямі руху, тобто вертикально вниз (мал. 26), тоді в будь-який момент часу  $t$  координата тіла  $y$  дорівнюватиме відстані  $h$ , пройденій тілом за час падіння:  $y = h$ . Оскільки початкова швидкість  $v_0 = 0$ , а прискорення  $a = g$ , рівняння руху буде:

$$y = \frac{gt^2}{2}.$$



Мал. 26



Мал. 27

В системі відліку, зображеній на мал. 26, під час вільного падіння вертикально вниз формули (7) і (8) запишуться так:

$$h = \frac{gt^2}{2}; \quad v = gt; \quad v = \sqrt{2gh}, \quad (9)$$

де  $h$  — шлях, пройдений за час падіння  $t$  від початкової точки вертикально вниз,  $v$  — миттєва швидкість тіла в момент часу  $t$ .

*Рух тіла, кинутого вгору.* Якщо тіло кинуть вертикально вгору з початковою швидкістю  $v_0$ , його рух під час підйому буде рівносповільненим і швидкість зменшуватиметься. Значення прискорення дорівнює за модулем прискоренню вільного падіння:  $a = |\vec{a}| = g$ . (Як і раніше, нехтуємо силою опору повітря). В цьому випадку під час розв'язання задач слід початок координатої осі  $OY$  поєднати з початковим положенням тіла на поверхні Землі і спрямувати вісь вертикально вгору (мал. 27). Тоді проекція прискорення дорівнюватиме  $a_y = -g$ , проекція швидкостей —  $v_{0y} = v_0$ ,  $v_y = v$ , а координата "y" в кожний момент руху дорівнюватиме висоті підйому  $h$ :  $y = h$ .

Загальне рівняння руху тіла, виражене формулою (8), для даного руху матиме вигляд:

$$y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Отже, якщо тіло кинуте вертикально вгору з початковою швидкістю  $v_0$ , його миттєва швидкість  $v$  за модулем зменшується, і рух описується наступними формулами:

$$v = v_0 - gt; \quad h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}; \quad v^2 = v_0^2 - 2gh,$$

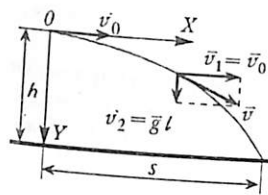
де  $h$  – висота підйому, тобто шлях, пройдений вгору за час  $t$ ;  $v$  – миттєва швидкість тіла на висоті  $h$ . Максимальна висота підйому  $h_m$  і час  $t_1$  підйому до цієї висоти визначаються за формулами:

$$h_m = \frac{v_0^2}{2g}; \quad t_1 = \frac{v_0}{g}.$$

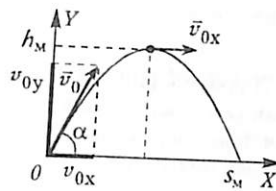
### Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

Розглянемо рух тіла, кинутого горизонтально або під кутом до горизонту. Як і раніше, нехтуватимемо опором повітря. Рух тіла в цьому випадку можна розглядати як такий, що складається з двох незалежних один від одного рухів: рівномірного прямолінійного в напрямі вектора початкової швидкості (рух за інерцією) і рівноприскореного вертикально вниз (вільне падіння тіла внаслідок тяжіння Землі).

**Рух тіла, кинутого в горизонтальному напрямі.** Нехай деяке тіло кинуте над Землею, паралельно до її поверхні, на висоті  $h$  з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ . Виберемо напрямки коор-



Мал. 28



Мал. 29

динатних осей так, як показано на мал. 28: вісь  $OX$  – паралельна до поверхні Землі, і напрямлена як початкова швидкість, тобто горизонтально, а вісь  $OY$  – вертикальна, спрямована вниз. Переміщуючись криволінійною траєкторією, тіло ніби одночасно рухається вздовж горизонталі (вісь  $OX$ ) і вертикалі (вісь  $OY$ ). В горизонтальному напрямі на тіло не діють жодні сили (в тому числі й сила опору) і тому рух вздовж осі  $OX$  – рівномірний і прямолінійний,  $\vec{v}_x = \vec{v}_0 = \text{const}$ . Рівняння цього руху

$$x = v_0 t, \quad (10)$$

де  $v_0$  – проекція швидкості  $\vec{v}_0$  на вісь  $OX$ ,  $v_x = v_0$ .

Рух тіла у вертикальному напрямі, тобто вздовж осі  $OY$ , є вільним падінням, тому рівняння руху вздовж осі  $OY$  таке:

$$y = \frac{gt^2}{2}. \quad (11)$$

Виключаючи час з рівняння руху (10) і (11), можна здобути рівняння траєкторії, яке виражає зв'язок між координатами  $x$  і  $y$ :

$$y = \frac{g}{2v_0^2} x^2.$$

З рівнянь (10) і (11) можна також вивести формули для обчислення часу  $t$  падіння тіла на Землю і модуля його переміщення  $s$  вздовж осі  $OX$  (т. зв. *дальність польоту*):

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad s = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Швидкість падіння тіла на Землю дорівнює

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}.$$

*Рух тіла, кинутого під кутом  $\alpha$  до горизонту з початковою швидкістю  $v_0$*  (мал. 29). Як і раніше, припускаємо, що опір повітря під час руху настільки малий, що його можна не враховувати. Рівняння руху вздовж осей  $OX$  та  $OY$ :

$$x = (v_0 \cos \alpha) t; \quad y = (v_0 \sin \alpha) t - \frac{gt^2}{2}.$$

Виключаючи час  $t$  з рівнянь руху, легко здобути рівняння траєкторії:

$$y = (\operatorname{tg} \alpha)x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2.$$

Позначивши  $\operatorname{tg} \alpha = c$ ,  $g/(2v_0^2 \cos^2 \alpha) = b$ , дістанемо рівняння

$$y = cx - bx^2,$$

в якому  $b$  і  $c$  – певні додатні для даного руху сталі параметри. Отже, *траєкторія руху тіла, ки-*

*нутого під кутом до горизонту, – парабола, вітки якої напрямлені вниз.*

Час руху до максимальної висоти підйому ( $t_1$ ) дорівнює часу падіння з максимальної висоти ( $t_2$ ):

$$t_1 = t_2 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Швидкість  $v$ , з якою тіло падає на Землю, за модулем дорівнює початковій швидкості:  $v = v_0$ .

Максимальна висота підйому тіла над Землею:

$$h_m = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Дальність польоту:

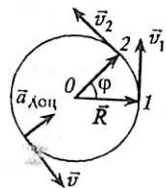
$$s_m = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

### Рівномірний рух по колу

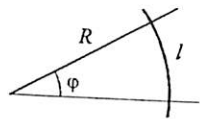
*Рівномірний рух тіла (матеріальної точки) по колу* (мал. 30) – рух зі сталою за модулем швидкістю; при цьому в кожній точці кола миттєва швидкість напрямлена по дотичній до кола.

*Лінійна швидкість* під час рівномірного руху по колу – величина, що чисельно дорівнює шляху, який проходить тіло за одиницю часу:

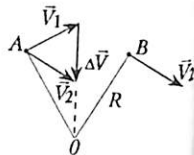
$$v = \frac{l}{t},$$



Мал. 30



Мал. 31



Мал. 32

де  $l$  – довжина дуги кола, пройденої за час  $t$ . Лінійна швидкість чисельно дорівнює модулю миттєвої швидкості.

Кутова швидкість  $\omega$  тіла, що рівномірно рухається коловою траєкторією, чисельно дорівнює відношенню кута  $\varphi$ , на який повертається проведений до тіла радіус-вектор  $\vec{R}$  (мал. 30), до часу руху  $t$ :

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

У фізиці прийнято вимірювати кути в радіанах (рад), а куту швидкість – у радіанах за секунду (рад/с = 1/с = с<sup>-1</sup>). Нагадаємо, що радіан – це безрозмірна одиниця виміру кута. Кут в 1 рад – це кут, у якого довжина дуги кола дорівнює радіусу цього кола. Щоб знайти значення кута  $\alpha$  в радіанах, слід провести з його вершини довільну дугу і знайти відношення довжини цієї дуги до радіуса  $R$  кола (мал. 31):

$$\varphi = \frac{l}{R}.$$

Зв'язок між лінійною  $v$  та кутовою  $\omega$  швидкостями виражається формулою:

$$v = \omega R,$$

де  $R$  – радіус кола.

Період обертання  $T$  – час одного повного оберту радіуса-вектора матеріальної точки, що рухається по колу. Частота обертання  $\nu$  показує, скільки обертів по колу здійснює тіло за одиницю часу. Частота, період та кутова швидкість пов'язані формулами:

$$\nu = \frac{1}{T}; \quad \omega = 2\pi\nu; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (12)$$

Під час рівномірного руху по колу модуль швидкості  $v$  має сталі значення, а напрям вектора швидкості змінюється з часом (мал. 30, 32). Вектор зміни швидкості ( $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ ) завжди спрямований до центра кола. Тому рівномірний рух по колу – це рух з прискоренням:  $\vec{a} = \Delta\vec{v}/t$ .

Прискорення, що характеризує швидкість зміни вектора миттєвої швидкості матеріальної точки під час її руху колу, називається доцентровим прискоренням і позначається  $\vec{a}_{\text{доц}}$ .

Модуль доцентрового прискорення дорівнює

$$a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = 4\pi\nu^2 R. \quad (13)$$

Напрямок вектора  $\vec{a}_{\text{доц}}$  змінюється з часом. У будь-якій точці кола вектор доцентрового прискорення  $\vec{a}_{\text{доц}}$  напрямлений до центра кола, тобто перпендикулярно до вектора миттєвої швидкості.

## Розділ 2. Динаміка

### Перший закон Ньютона.

#### Принцип відносності Галілея

*Динаміка* – це розділ механіки, в якому вивчають рух матеріальних тіл з урахуванням їх взаємодій. В основі динаміки лежать три закони Ньютона, що є основними законами класичної механіки і не можуть бути виведені з інших, простіших законів. Ньютон сформулював їх, узагальнивши численні спостереження вчених (передусім, Г. Галілея) під час вивчення механічних явищ.

Закони Ньютона дійсні для макроскопічних тіл швидкість руху яких набагато менша, ніж швидкість світла у вакуумі.

#### Перший закон Ньютона:

якщо на тіло не діють інші тіла (сили) або дія цих тіл (сил) компенсована, то тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху.

Системи відліку, в яких діє перший закон Ньютона, тобто системи, де вільне тіло перебуває в стані спокою або рухається рівномірно й прямолінійно, називаються *інерціальними системами відліку*. Будь-яка система відліку, що рухається відносно обраної інерціальної системи рівномірно і прямолінійно, так само буде інерціальною.

*Інерція* – явище збереження тілом стану спокою або рівномірного прямолінійного руху за від-

сутності або компенсації зовнішніх взаємодій. Прямолінійний і рівномірний рух вільного тіла в інерціальній системі відліку називають *рухом за інерцією*, а перший закон Ньютона – *законом інерції*.

Наприклад, рух літака, показаний на малюнку 33, є рухом за інерцією, якщо сили, що діють на літак, компенсують одна одну.

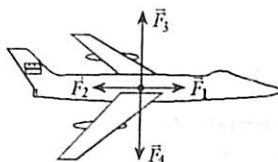
Перший закон Ньютона підтверджує факт існування інерціальних систем відліку і описує характер руху вільного тіла в інерціальній системі. Тому цей закон можна сформулювати так:

існують такі системи відліку, в яких вільне тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху.

#### Принцип відносності Галілея, або механічний принцип відносності:

в будь-яких інерціальних системах відліку закони механічного руху однакові.

Принцип відносності Галілея засвідчує фізичну рівноправність всіх інерційних систем відліку. Це означає, що жодними механічними дослідженнями, проведеними в якійсь інерціальній системі відліку, не можна визначити, перебуває дана система в спокої чи рухається рівномірно й прямолінійно.



Мал. 33

## Маса

Властивість тіла зберігати свою швидкість чи стан спокою відносно інерціальної системи відліку за відсутності взаємодії з іншими тілами називають *інертністю*. Якщо на тіло діє інше тіло (тобто сила), то інертність виявляється в тому, що різні тіла під дією однакових сил дістають різні прискорення.

Інертність властива всім тілам. Завдяки інертності для зміни швидкості необхідний час, тобто швидкість не може змінитися миттєво.

Інертність має кількісну міру, тобто можна вести мову про більшу або меншу інертність тіл. Величину, що є кількісною мірою інертності тіла, називають *масою*. Маса – основна динамічна характеристика тіла.

**Вимірювання маси.** Для вимірювання маси в СІ існує еталон, оскільки одиниця маси – основна одиниця в СІ. Еталон – циліндр певних розмірів зі сплаву платини та іридію. Маса цього еталона прийнята за 1 кг.

Існує два способи вимірювання маси. Перший спосіб – привести тіло невідомої маси  $m$  у взаємодію з еталоном. Експерименти показують, що відношення мас взаємодіючих тіл дорівнює оберненому відношенню модулів прискорень, що вони набули внаслідок цієї взаємодії:

$$\frac{m}{m_{\text{ет}}} = \frac{a_{\text{ет}}}{a}$$

Тому масу  $m$  тіла можна визначити за формулою

$$m = m_{\text{ет}} \frac{a_{\text{ет}}}{a},$$

де  $m_{\text{ет}}$  – маса еталона,  $a$  і  $a_{\text{ет}}$  – прискорення тіла і еталона.

В повсякденній практиці використовують зручніший спосіб вимірювання маси – порівнюють маси тіл на важільних терезах. При цьому користуються набором еталонних тіл – *гирь*.

**Густиною речовини**  $\rho$  називають величину, що дорівнює відношенню маси однорідного тіла  $m$  до його об'єму  $V$ :

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

Фізичний зміст густини полягає в тому, що вона показує, яка маса даної речовини міститься в одиниці об'єму. Одиниця густини – кілограм на кубічний метр ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Числові значення густин різних речовин значно відрізняються одне від одного. Наприклад, для води  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , для льоду  $\rho = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$ , для заліза  $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Густину речовини можна визначити через масу однієї молекули  $m_0$  і концентрацію молекул  $n$ :

$$\rho = m_0 n.$$

Нагадаємо, що *концентрація молекул* дорівнює відношенню загальної кількості молекул  $N$ , що містяться в певному об'ємі речовини, до значення цього об'єму  $V$ :

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



Якщо відомий об'єм тіла і матеріал, з якого це тіло зроблене, за таблицями знаходять значення його густини  $\rho$  і обчислюють масу за формулою:

$$m = \rho V. \quad (14)$$

### Сила. Рівнодійна сил

*Силою* називають векторну фізичну величину, яка є мірою механічної дії на тіло з боку інших тіл або полів. Сила повністю визначена, якщо задані її модуль, напрям і точка прикладання. В результаті дії сили дане тіло змінює швидкість або деформується.

Отже, коли на тіло діє інше тіло, то кажуть, що "на тіло діє сила". В механіці розглядають сили пружності, гравітаційні сили і сили тертя.

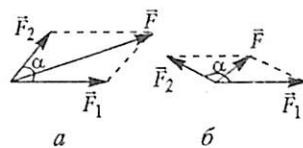
Одиниця сили – ньютон (Н):  $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$ . 1 Н – це сила, яка надає тілу масою 1 кг прискорення  $1 \text{ м} / \text{с}^2$ .

*Рівнодійна сила*  $\vec{F}$  – сила, дією якої можна замінити дію кількох сил  $\vec{F}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), прикладених до тіла в одній точці. Рівнодійна дорівнює геометричній сумі всіх сил, що діють на тіло:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \text{ або } \vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i.$$

*Рівнодійна  $\vec{F}$  двох однаково напрямлених сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$*  за значенням дорівнює сумі їх модулів ( $F = F_1 + F_2$ ) і напрямлена в той самий бік. *Рівнодійна  $\vec{F}$  двох протилежно напрямлених сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$*  за значенням дорівнює різниці їх модулів ( $F = |F_1 - F_2|$ ) і напрямлена в бік більшої сили.

Напрямок рівнодійної двох сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , що діють під кутом  $\alpha$  одна до одної, збігається з діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах сил як на сторонах (мал. 34), а модуль рівнодійної згідно з формулою (1) дорівнює



Мал. 34

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}.$$

### Другий закон Ньютона

*Другий закон Ньютона:*

прискорення  $\vec{a}$ , яке надає тілу сила  $\vec{F}$ , спрямоване в напрямі діючої сили, прямо пропорційне значенню цієї сили і обернено пропорційне масі тіла  $m$ :

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

або

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (15)$$

Отже, сила дорівнює добутку маси на прискорення.

Другий закон Ньютона можна записати в іншій формі, якщо ввести величину, що називається *імпульсом*. Імпульс тіла – це векторна величина, що є мірою механічного руху і дорівнює добутку маси тіла на швидкість його руху:

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

Одиниця імпульсу – кілограм-метр за секунду (кг·м/с).

Ураховуючи, що прискорення

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

підставимо цей вираз у рівняння другого закону Ньютона. Дістанемо

$$\bar{F} = m\bar{a} = \frac{m\bar{v} - m\bar{v}_0}{t} = \frac{\bar{p} - \bar{p}_0}{t}.$$

Отже, сила дорівнює зміні імпульсу за одиницю часу. Останню формулу можна записати так:

$$\bar{F}t = \Delta\bar{p}, \quad \text{або} \quad \bar{F}t = m\bar{v} - m\bar{v}_0.$$

Добуток сили  $\bar{F}$  на час  $t$  її дії називають імпульсом сили. Тепер другий закон Ньютона можна сформулювати так:

в результаті дії сили змінюється імпульс тіла. Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили.

В разі дії на тіло одночасно кількох сил  $\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n$  другий закон Ньютона твердить:

прискорення тіла прямо пропорційне рівнодійній  $\bar{F}$  сил, прикладених до тіла, обернено пропорційне масі тіла і напрямлене в бік рівнодійної:

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m} \quad \text{або} \quad \bar{a} = \frac{\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \dots + \bar{F}_n}{m}.$$

Якщо ж записати останнє рівняння у вигляді

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \dots + \bar{F}_n = m\bar{a}, \quad (16)$$

отримаємо т.зв. *основне рівняння динаміки* – одну з форм запису другого закону Ньютона в разі дії на тіло водночас кількох сил.

### Третій закон Ньютона

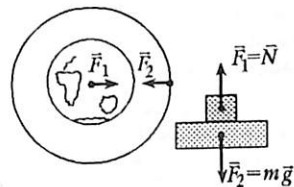
Другий закон Ньютона розглядає вплив одних тіл на характер руху певного тіла. Але такий вплив не може бути одностороннім – лише взаємний. Характер парної взаємодії лежить в основі *третього закону Ньютона*:

тіла діють одне на одне з силами, напрямленими вздовж однієї прямої, рівними за модулем і протилежними за напрямом:

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

Сили  $\bar{F}_1$  та  $\bar{F}_2$ , що виникають під час взаємодії, прикладені до різних тіл і тому не можуть урівноважити одна одну. За будь-яких взаємодій сили виникають або зникають тільки парами і завжди мають однакову природу (мал. 35).

Відповідно до принципу відносності Галілея другий і третій закони Ньютона проявляються тільки в інерціальних системах відліку.

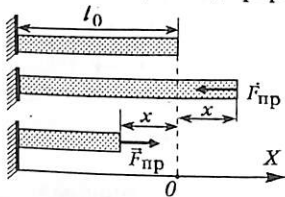


Мал. 35

## Сили пружності

Деформація тіла – зміна його форми, розмірів чи об'єму під дією зовнішніх сил. Деформації бувають пружні і пластичні. Якщо деформації повністю зникають після припинення дії на тіло зовнішніх сил, їх називають *пружними*. Під час пружних деформацій в тілі виникають сили, які називають *силами пружності*. Під дією зовнішньої сили частинки тіла (атоми, молекули) зміщуються зі своїх положень рівноваги, при цьому в тілі виникають сили, що намагаються повернути частинки в положення рівноваги. Це і є сили пружності. Вони мають електромагнітну природу.

Розглянемо деформацію однобічного розтягу або стиску пружного стержня (т. зв. *повздовжню деформацію*), що відбувається під дією зовнішньої сили, спрямованої вздовж стержня). Якщо один кінець стержня закріплений і нерухомий, то другий кінець під час деформації переміщуватиметься вздовж осі стержня. Спрямуюємо координатну вісь  $Ox$  вздовж стержня і поєднаємо початок осі  $Ox$  з вільним кінцем недеформованого стержня (мал. 36).



Мал. 36

Тоді під час розтягу або стиску видовження стержня буде вимірюватися величиною  $|x|$ , де  $x$  – координата вільного кінця стержня. Під час розтягу стержня  $x > 0$ , при стиску –  $x < 0$ .

Для пружних деформацій експериментально встановлений *закон Гука*. Для однобічного розтягу (стиску), зображеного на мал. 36, його формулюють так:

сила пружності  $F_{пр}$ , яка виникає під час деформації тіла, прямо пропорційна видовженню тіла  $x$  і напрямлена у бік, протилежний до напрямку переміщення частинок тіла під час деформації:

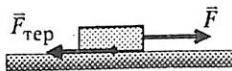
$$(F_{пр})_x = -kx. \quad (17)$$

Коефіцієнт  $k$  називають *жорсткістю*; його значення залежить від розмірів та матеріалу тіла. Значення  $k$  чисельно дорівнює силі пружності, що виникає під час видовження на  $x = 1$  м. Одиниця жорсткості – ньютон на метр (Н/м).

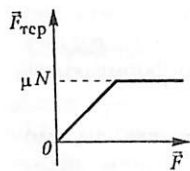
## Сили тертя

*Сили тертя* – це сили, що виникають у місцях дотику тіл, напрямлені по дотичній до їхньої поверхні й перешкоджають переміщенню одного тіла відносно іншого (мал. 37). Сили тертя зумовлені взаємодією молекул і мають електромагнітну природу.

*Тертя спокою* – тертя, яке існує між дотичними поверхнями, коли відсутнє їхнє взаємне переміщення. Сила тертя спокою в кожний момент дорівнює за модулем прикладеній зовнішній силі й спрямована в бік можливого руху, тобто протилежно силі, яка



Мал. 37



Мал. 38

намагається зсунути тіло. Сила тертя при зростанні зовнішньої сили збільшується доти, доки не почнеться ковзання. При ковзанні теж діє сила, що перешкоджає рухові – *сила тертя ковзання*. Вона приблизно дорівнює максимальній силі тертя спокою.

Якщо під час ковзання збільшувати зовнішню силу, прикладену до тіла в напрямі руху, сила тертя ковзання залишатиметься незмінною, завжди напрямленою протилежно зовнішній силі (мал. 38).

Експериментально встановлено *закон тертя*:

сила тертя ковзання  $\vec{F}_{\text{тер}}$  завжди напрямлена проти руху і за значенням прямо пропорційна силі нормального тиску:

$$F_{\text{тер}} = \mu N,$$

де  $\mu$  – коефіцієнт, що називають *коефіцієнтом тертя*,  $N$  – сила нормального тиску тіла на опору (або рівна їй за модулем сила реакції опору). Коефіцієнт тертя залежить від матеріалу і якості обробки стичних поверхонь; він показує, яку частину складає сила тертя від сили нормального тиску:

$$\mu = \frac{F_{\text{тер}}}{N}.$$

Якщо одне тіло котиться по поверхні іншого, виникає *тертя кочення*. За умови однакової яко-

сті поверхонь тертя кочення менше від тертя ковзання в десятки разів. Тому в машинах прагнуть замінити тертя ковзання тертям кочення.

Наведемо деякі формули обчислення сили тертя.

1. Розглянемо випадок, коли до тіла, що знаходиться на горизонтальній поверхні, прикладена сила  $\vec{F}$ , під дією якої воно ковзає по поверхні. Модуль сили тертя ковзання при цьому залежатиме як від значення сили  $\vec{F}$ , так і від кута  $\alpha$ , під яким вона діє (мал. 39). Це можна пояснити тим, що сила  $\vec{F}$  зменшує силу  $\vec{N}'$  тиску тіла на опору (і рівну їй за модулем силу реакції  $\vec{N}$ ):

$$N' = N = mg - F \sin \alpha.$$

Тому

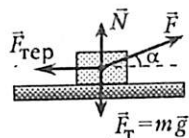
$$F_{\text{тер}} = \mu N = \mu (mg - F \sin \alpha). \quad (18)$$

2. Розглянемо тепер рух тіла горизонтальною поверхнею під дією сили  $\vec{F}$ , спрямованої вздовж цієї поверхні (мал. 37). Даний приклад руху можна розглядати як граничний випадок застосування формули (18) при  $\alpha=0$ . Поклавши в (18)  $\alpha=0$  і враховуючи, що  $\sin 0^\circ = 0$ , одержуємо

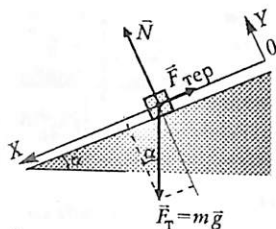
$$F_{\text{тер}} = \mu mg.$$

3. Якщо у вертикальному напрямі на тіло, крім сили тяжіння  $m\vec{g}$ , діє якась сила  $\vec{F}$ , силу тертя визначаємо за формулою

$$F_{\text{тер}} = \mu (mg \pm F).$$



Мал. 39



Мал. 40

Знак плюс відповідає випадку, коли сила  $\vec{F}$  напрямлена вертикально вниз, знак мінус – вгору.

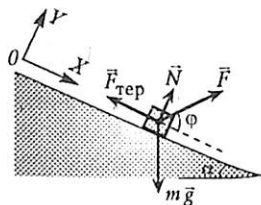
4. Під час ковзання похилою площиною модуль сили реакції  $\vec{N}$  дорівнює модулю проекції сили тяжіння  $m\vec{g}$  на вісь  $OY$  (мал. 40):  $N = mg \cdot \cos \alpha$ . Тому сила тертя ковзання дорівнює

$$F_{\text{тер}} = \mu N = \mu mg \cdot \cos \alpha. \quad (19)$$

5. При невеликому куті нахилу площини до горизонту тіло нерухомо лежить на похилій площині, а сила тертя спокою менша від максимально можливого значення. В цьому разі сила тертя спокою дорівнює за модулем проекції сили тяжіння на вісь  $OX$  (мал. 40):

$$F_{\text{тер}} = mg \cdot \sin \alpha.$$

При збільшенні кута нахилу площини проекція сили тяжіння на вісь  $OX$  ( $mg \cdot \sin \alpha$ ) зростає, водночас зростає рівна їй за модулем сила тертя спокою. Коли сила тертя спокою досягає максимально можливого значення, починається ковзання.



Мал. 41

Граничний кут  $\alpha_m$ , при якому починається ковзання, визначається з рівняння

$$mg \cdot \sin \alpha_m = \mu N, \text{ або } mg \cdot \sin \alpha_m = \mu mg \cdot \cos \alpha_m.$$

З останньої рівності знаходимо

$$\frac{\sin \alpha_m}{\cos \alpha_m} = \mu \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha_m = \mu \Rightarrow \alpha_m = \operatorname{arctg} \mu.$$

При  $\alpha = \alpha_m$  тіло скочується похилою площиною зі сталою швидкістю, а при  $\alpha > \alpha_m$  – рівноприскорено.

6. Розглянемо тепер складніший випадок – рух тіла похилою площиною під дією зовнішньої сили  $\vec{F}$ . Позначимо кут нахилу похилої площини до горизонту  $\alpha$ , а кут між напрямом дії сили  $\vec{F}$  і похилою площиною –  $\varphi$  (мал. 41). Крім сили  $\vec{F}$ , на тіло діє сила тяжіння  $\vec{F}_t = mg$ , сила реакції похилої площини  $\vec{N}$  і сила тертя  $\vec{F}_{\text{тер}}$ . Проектуючи сили на координатну вісь  $OY$ , зображену на мал. 41, маємо  $N + F \sin \varphi - mg \cos \alpha = 0$ , звідки  $N = mg \cos \alpha - F \sin \varphi$ . Отже, модуль сили тертя в цьому випадку дорівнює

$$F_{\text{тер}} = \mu N = \mu (mg \cos \alpha - F \sin \varphi). \quad (20)$$

у граничному випадку, коли зовнішня сила  $\vec{F}$  діє вздовж похилої площини, з (20) отримаємо формулу (19). Справді, якщо зовнішня сила напрямлена вздовж похилої площини вниз ( $\varphi=0$ ) або вгору ( $\varphi=180^\circ$ ),  $\sin \varphi = 0$ , сила реакції  $N = mg \cos \alpha$ , і формула (20) набуває вигляду:  $F_{\text{тер}} = \mu mg \cos \alpha$ . Нагадаємо, що сила тертя ковзання завжди напрямлена в бік, протилежний рухові.

## Сили тяжіння

Сила тяжіння  $\vec{F}_T$  – це сила, з якою Земля діє на кожне тіло і надає йому прискорення. У відповідності з другим законом Ньютона сила тяжіння тіла масою  $m$  дорівнює

$$\vec{F}_T = m\vec{g}, \quad (21)$$

де  $\vec{g}$  – прискорення вільного падіння. Значення  $g$  залежить від географічної широти місця і його висоти над рівнем моря.

Точку, в якій прикладена сила тяжіння даного тіла, називають *центром тяжіння тіла*. Коли тіло однорідне (густина в усіх його частинах однакова) і має правильну геометричну форму (куб, куля, циліндр тощо), центр тяжіння тіла міститься в його геометричному центрі.

Сила *всесвітнього тяжіння*, або *гравітаційна сила*, – це сила взаємного притягання між усіма матеріальними тілами. Визначають гравітаційну силу за *законом всесвітнього тяжіння*, сформульованим Ньютоном:

всі тіла притягуються одне до одного; сила  $F$  всесвітнього тяжіння між двома тілами прямо пропорційна їхнім масам  $m_1$ ,  $m_2$  і обернено пропорційна квадратові відстані  $r$  між ними:

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

де  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup> – *гравітаційна стала*, яку визначають дослідним шляхом. Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі притягання двох тіл масою 1 кг кожне, якщо відстань між ними 1 м.

Гравітаційні сили, або сили взаємного притягання, прикладені до кожної матеріальної частинки і напрямлені вздовж прямої, що їх з'єднує, тому ці сили називають *центральними*.

Гравітаційне притягання зумовлене полем, яке існує навколо кожного тіла (*гравітаційне поле*). Поле одного тіла діє на друге тіло і навпаки. Найважливіша особливість гравітаційного поля полягає в тому, що сили цього поля (гравітаційні сили, або сили тяжіння) є *консервативними*, тобто такими, робота яких не залежить від форми траєкторії. Про це буде йти мова в наступному розділі.

На тіло масою  $m$ , що міститься на поверхні Землі, діє гравітаційна сила притягання з боку Землі:

$$F = G \frac{Mm}{R_3^2}, \quad (22)$$

де відстань між взаємодіючими тілами дорівнює радіусу Землі ( $r = R_3 \approx 6,38 \cdot 10^6$  м).

Якщо вважати систему відліку, пов'язану із Землею, інерціальною, сила тяжіння (21) дорівнює гравітаційній силі (22). Тоді:

$$mg = \frac{GmM}{R_3^2},$$

звідки матимемо формулу для обчислення прискорення вільного падіння через масу і радіус Землі:

$$g = \frac{GM}{R_3^2}. \quad (23)$$

Отже, прискорення вільного падіння визначається масою і радіусом Землі і не залежить від

маси тіла. Якщо в (23) підставити числові значення  $M$ ,  $R_3$  і  $G$ , можна обчислити, що  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Для інших небесних тіл (Сонце, Місяць, планети сонячної системи тощо) за формулою (23) обчислюють відповідні значення прискорення вільного падіння на цих тілах. Масу планети можна визначити через її середню густину  $\rho$  і радіус  $R$  за формулою:

$$M = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3.$$

Тоді формулі (23) можна надати вигляду:

$$g_{\text{пл}} = \frac{4}{3} \pi \rho G R.$$

*Залежність сили тяжіння і прискорення вільного падіння від висоти над Землею.* Позначимо силу тяжіння і прискорення вільного падіння біля поверхні Землі  $F_0$  і  $g_0$ , а на висоті  $h$  – відповідно  $F_h$  і  $g_h$ .

Якщо тіло піднімають з поверхні Землі до висоти  $h$ , відстань від тіла до центру Землі збільшується від  $R_3$  до  $R_3 + h$ , а сила тяжіння зменшується від  $F_0$  до  $F_h$ , причому

$$F_0 = \frac{GMm}{R_3^2}, \quad F_h = \frac{GMm}{(R_3 + h)^2}.$$

Відповідно й прискорення вільного падіння біля поверхні Землі і на висоті  $h$  дорівнюватимуть

$$g_0 = \frac{GM}{R_3^2} \quad \text{і} \quad g_h = \frac{GM}{(R_3 + h)^2}. \quad (24)$$

З формули (24) матимемо рівність

$$g_h = g_0 \left( \frac{R_3}{R_3 + h} \right)^2.$$

В першому наближенні при  $h \ll R_3$

$$g_h = g_0 \left( 1 - \frac{2h}{R_3} \right).$$

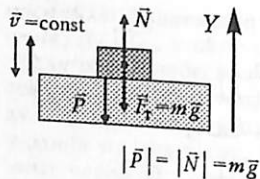
### Вага тіла. Невагомість

У механіці для сил взаємодії тіла з горизонтальною площиною використовують спеціальні позначення. Розглянемо сили, що діють на тіло, яке лежить на підставці (мал. 42). Оскільки підставка перешкоджає падінню, тіло тисне на неї з якоюсь силою і деформує її. Цю силу називають *вагою* і позначають літерою  $\bar{P}$ . Опора, що деформована покладенням на неї тілом, діє на нього з силою  $\bar{N}$ , спрямованою вертикально вгору; цю силу називають *силою реакції опори*.

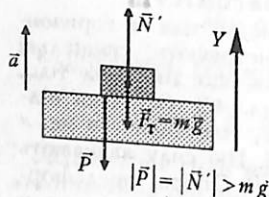
Таким чином, на тіло, яке лежить на горизонтальній поверхні, діють врівноважені сили – сила тяжіння і сила реакції опори. Їх рівнодійна дорівнює нулю:

$$\bar{F}_T + \bar{N} = 0$$

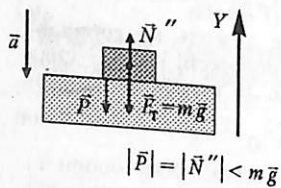
Підкреслимо, що на будь-яке тіло з боку опори чи підставки завжди діє сила пружності, яку прийнято називати силою реакції ( $\bar{N}$ ). Відповідно до третього закону Ньютона тіло діє на підставку з рівною за модулем й протилежною за напрямом силою  $\bar{P}$ . Ця сила прикладена до підставки і є вагою тіла. Як і сила реакції опори, вага відноситься до сил пружності, тобто, на відміну від сил тяжіння (тобто гравітаційних сил), має електромагнітну природу.



Мал. 42



Мал. 43



Мал. 44

рухається вертикально зменшується:

$$P = m(g - a). \quad (26)$$

Невагомістю називають стан тіла, в якому його вага дорівнює нулю. Відповідно до (26) стан неваго-

Отже, вагою називають силу, з якою тіло діє на опору (або розтягує підвіс). Вага прикладена не до тіла, а до опори або підвісу. Коли опора чи підвіс нерухомі або рухаються рівномірно і прямолінійно відносно Землі, вага за модулем дорівнює силі тяжіння (мал. 42):

$$P = mg.$$

Якщо тіло спирається на підставку, що прискорено рухається вгору (мал. 43), вага тіла зростає:

$$P = m(g + a), \quad (25)$$

де  $a$  – модуль прискорення.

Отже, коли прискорення напрямлене вгору, виникає *перевантаження* – збільшення ваги тіла, спричинене прискоренням руху опори.

Якщо ж тіло разом з підставкою прискорено рухається вгору, вага тіла зростає.

мості досягається, якщо тіло рухається з прискоренням  $\vec{a} = \vec{g}$ , тобто вільно падає. Отже, стан вільного падіння тіл є станом невагомості.

В стані невагомості на всі тіла системи діють лише сили всесвітнього тяжіння і надають усім тілам системи однакового прискорення. Тому ці тіла не тиснуть одне на одне й на опори і не спричиняють деформації тіл. Невагомість досягається під час польоту космічного корабля з вимкненими двигунами і за відсутності опору повітря.

В реальних умовах Землі стан невагомості спостерігається також в перші миттєвості вільного падіння під дією сили тяжіння, коли сила опору повітря мала і не впливає на рух тіла.

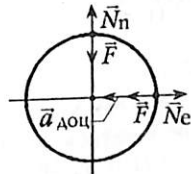
### Залежність сили тяжіння від географічної широти місцевості

На полюсах Землі гравітаційна сила (22), з якою Земля притягує тіло масою  $m$ , є силою тяжіння, що надає тілу прискорення вільного падіння. Позначимо її  $\vec{F} = m\vec{g}_n$  (мал. 45). З такою ж за модулем силою нерухоме тіло на полюсах тисне на поверхню Землі. Це означає, що вага тіла  $P_n$  на полюсах теж може бути обчислена за формулою (22). Отже,

$$P_n = mg_n = \frac{GmM}{R_3^2}. \quad (27)$$

Відповідно до (27) модуль прискорення вільного падіння  $g_n$  на полюсі дорівнює

$$g_n = \frac{GM}{R_3^2}. \quad (28)$$



Мал. 45



Підстановка числових значень дає  $g_{\text{п}} \approx 9,83 \text{ м/с}^2$ .

Тіло, що міститься на поверхні Землі на широті екватора, обертається навколо земної осі, тобто рухається по колу. Це означає, що тіло рухається з доцентровим прискоренням  $\vec{a}_{\text{доц}}$ , напрямленим до осі обертання (мал. 45), рівним за модулем  $a_{\text{доц}} = \omega^2 R_3$ , де  $\omega$  – кутова швидкість добового обертання Землі. Основний закон динаміки в цьому випадку має вигляд

$$\vec{F} + \vec{N}_e = m \vec{a}_{\text{доц}}$$

де  $\vec{F}$  – сила всесвітнього тяжіння;  $\vec{N}_e$  – сила реакції земної поверхні на екваторі. Враховуючи напрями векторів  $\vec{F}$ ,  $\vec{N}_e$  і  $\vec{a}_{\text{доц}}$  на екваторі (мал. 45) і значення їх модулів, можна записати основний закон динаміки в проекції на напрям вздовж радіуса Землі до її центру:

$$G \frac{Mm}{R_3^2} - N_e = \omega^2 R_3,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість добового обертання Землі. З останнього рівняння знаходимо силу реакції земної поверхні  $\vec{N}_e$  на екваторі і рівну їй за модулем вагу тіла на екваторі:

$$P_e = N_e = G \frac{Mm}{R_3^2} - \omega^2 R_3.$$

Так само сила тяжіння тіла на екваторі ( $F_e$ ) зменшується порівняно із силою тяжіння на полюсі ( $F_{\text{п}}$ ) на величину  $m \omega^2 R_3$ :

$$F_e = F_{\text{п}} - m \omega^2 R_3. \quad (29)$$

Значення кутової швидкості  $\omega$  обчислюють через період обертання земної кулі, тобто через тривалість доби:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,14}{24 \cdot 3600 \text{ с}} \approx 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}.$$

Підставляючи значення  $\omega$  в (29), можна показати, що значення  $m \omega^2 R_3$  складає приблизно 0,3% від значення  $F_{\text{п}}$ . Отже, внаслідок добового обертання земної кулі, сила тяжіння на екваторі менша від сили тяжіння на полюсі на 0,3%. Внаслідок несферичної форми земної кулі різниця  $F_{\text{п}} - F_e$  ще більша і в цілому становить 0,5% від значення  $F_{\text{п}}$ . Така сама різниця між вагою тіла на екваторі та полюсах.

Внаслідок вищесказаного прискорення вільного падіння  $g_e$  на екваторі менше, ніж на полюсах, на 0,5% і дорівнює  $9,78 \text{ м/с}^2$ . За середнє значення біля поверхні земної кулі прийнято  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

### Динаміка обертального руху по колу

Ми вже знаємо, що рівномірний рух тіла по колу – це рух з прискоренням. Цього прискорення, яке називають доцентровим, надає тілу одна або декілька сил, рівнодійна яких напрямлена вздовж радіуса до центра кола.

Згідно з другим законом Ньютона і формулами (13), за якими визначають доцентрове прискорення, модуль рівнодійної сил, під дією яких тіло рухається коловою траєкторією, визначається так:

$$F = m \frac{v^2}{R}; \quad F = m \omega^2 R; \quad F = m \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Наприклад, автомобілю, який повертає, рухаючись на шосе, доцентрове прискорення надає сила тертя колес з дорогою, а планетам, що рухаються навколо Сонця – сила тяжіння між планетами і Сонцем.

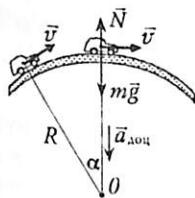
Підкреслимо, що рух тіла по колу здійснюється не в результаті дії якихось спеціальних сил, а в результаті реальної дії тіла з іншими тілами (з ниткою, з Землею і таке ін). Головне, щоб їх результуюча мала від'ємну від нуля проекцію на радіус, який сполучає тіло й центр кола. Тому в задачах, як правило, достатньо спроектувати сили на радіус, що сполучає тіло з центром кола, яким воно рухається, і записати основний закон динаміки в проекціях на цей напрям.

### Вага тіла, що рухається опуклою або увігнутою поверхнею

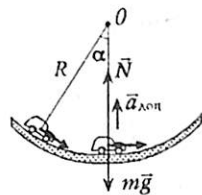
Рух тіла зі сталою швидкістю  $v$  по опуклому (увігнутому) мосту радіусом  $R$  – це рух по дузі кола з доцентровим прискоренням ( $a_{\text{доц}} = v^2/R$ ), спрямованим до центра цього кола. Під час руху по опуклому мосту вага  $P'$  автомобіля найменша в найвищій точці траєкторії, а доцентрове прискорення напрямлене вертикально вниз (мал. 46). У цьому випадку вага  $P'$  (і рівна їй за модулем сила реакції  $N'$ ) дорівнює

$$P' = N' = m(g - a_{\text{доц}}) = m\left(g - \frac{v^2}{R}\right).$$

З цієї формули видно, що під час руху опуклим мостом вага зменшується із зростанням швидкості



Мал. 46



Мал. 47

автомобіля і може навіть дорівнювати нулеві. Очевидно, це можливо, коли вираз у дужках дорівнюватиме нулю, тобто при значенні швидкості

$$v = \sqrt{gR}.$$

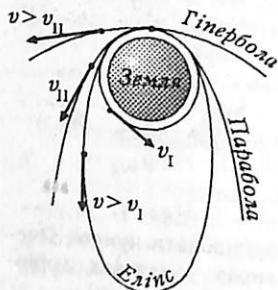
Під час руху по увігнутому мосту зі сталою за модулем швидкістю  $v$  вага  $P''$  автомобіля найбільша в найнижчій точці траєкторії, а доцентрове прискорення напрямлене вгору (мал. 47). У цьому випадку

$$P'' = N'' = m(g + a_{\text{доц}}) = m\left(g + \frac{v^2}{R}\right).$$

### Космічні швидкості

Перша космічна швидкість  $v_1$  – це швидкість, з якою тіло (супутник) рухається навколо Землі коловою орбітою тільки під дією сили всесвітнього тяжіння (мал. 48). Під час цього руху всі тіла в супутнику перебувають у стані невагомості.

Сила тяжіння надає супутнику і всім тілам, що в ньому містяться, однакове доцентрове прискорення:  $a_{\text{доц}} = v_1^2/R$ , де  $R$  – радіус орбіти. Тому значення першої космічної швидкості  $v_1$  можна обчислити за другим законом Ньютона:



Мал. 48

Перша космічна швидкість поблизу поверхні Землі, тобто при  $h \ll R_3$ :

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R_3}} = \sqrt{gR_3} \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Друга космічна швидкість  $v_{II}$  — це мінімальна відносно Землі швидкість, яку треба надати супутнику, щоб він подолав земне тяжіння і став супутником Сонця, так само як обертаються планети сонячної системи, зокрема і наша Земля. Обчислення показують, що

$$v_{II} = \sqrt{2} \cdot v_I \approx 11,2 \text{ км/с.}$$

Третьою космічною швидкістю  $v_{III}$  називають швидкість, яку треба надати космічному апарату біля поверхні Землі, щоб він покинув межі Сонячної системи і став супутником Галактики:

$$v_{III} \approx 16,6 \text{ км/с.}$$

$$F = ma_{\text{доц}} \text{ або}$$

$$G \frac{mM}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

де  $m$ ,  $M$  — маси супутника і Землі;  $R = R_3 + h$ ,  $R_3$  — радіус Землі;  $h$  — висота супутника над Землею. З останньої рівності маємо

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R_3 + h}}$$

## Розділ 3. Закони збереження імпульсу та енергії

### Закон збереження імпульсу

Групу тіл, які взаємодіють між собою і не взаємодіють з іншими тілами, називають *замкненою системою*. Повним імпульсом такої системи є векторна сума імпульсів усіх  $n$  тіл, що входять до її складу:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n.$$

Численними експериментами встановлено:

імпульс системи може перерозподілятися між тілами внаслідок їх взаємодії, але повний імпульс замкненої системи залишається сталим (зберігається) за будь-якої взаємодії тіл цієї системи.

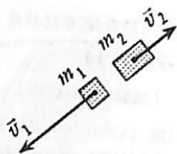
Цей закон збереження імпульсу, який записують як рівність

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 + \dots + m_n \vec{v}'_n$$

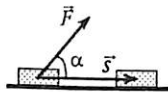
$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const},$$

де  $m_i$ ,  $\vec{v}_i$ ,  $\vec{v}'_i$  — маса та швидкості  $i$ -го тіла до і після взаємодії,  $n$  — кількість тіл системи.

Якщо взаємодіють лише два тіла, то під час взаємодії (наприклад, зіткнення) одне тіло частину свого імпульсу передає іншому. На скільки імпульс одного тіла зменшується, на стільки імпульс другого збільшується. При цьому геомет-



Мал. 49



Мал. 50

рична сума імпульсів двох тіл залишається сталою. Закон збереження імпульсу для двох тіл записують так:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \quad (27)$$

**Реактивним рухом** називають рух, що виникає внаслідок відокремлення і відльоту від тіла його частини. Інша частина тіла при цьому рухатиметься в протилежний бік (мал. 49). Під час реактивного руху швидкість однієї частини системи пов'язана зі швидкістю другої згідно із законом збереження імпульсу:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = 0 \Rightarrow \vec{v}_2 = -\frac{m_1}{m_2} \vec{v}_1.$$

### Робота. Потужність

**Робота** – скалярна величина, яка є мірою механічної дії сили під час переміщення точки її прикладання. **Робота, яка виконується сталою силою**, дорівнює добутку модуля сили, модуля переміщення і косинуса кута між напрямками сили та переміщення (мал. 50):

$$A = F s \cos \alpha \quad (28)$$

Одиниця роботи в СІ – джоуль (Дж):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .  $1 \text{ Дж}$  дорівнює роботі, яку виконує сила в  $1 \text{ Н}$  під час переміщення тіла на  $1 \text{ м}$ , якщо її напрям збігається з напрямом руху.

**Потужність** – скалярна величина, що дорівнює відношенню виконаної роботи до інтервалу часу, протягом якого вона була виконана:

$$N = \frac{A}{t} \quad (29)$$

**Потужність** – величина, яка показує кількість роботи, що виконується за одиницю часу. Одиниця потужності в СІ – ват (Вт):  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .  $1 \text{ Вт}$  – це потужність, при якій за  $1 \text{ с}$  виконується робота в  $1 \text{ Дж}$ .

Згідно з формулою (29) роботу можна визначити, якщо відома потужність  $N$  механізму, що її виконує, і час виконання  $t$ :

$$A = N t.$$

Ця формула дає можливість увести ще одну одиницю роботи, а отже і енергії – ват-секунду (Вт · с):  $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$ . Часто зустрічається значно більша одиниця роботи і енергії – кіловат-година (кВт · год):  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

Якщо під дією сталої сили тяги  $F$  тіло рухається рівномірно зі швидкістю  $v$ , то потужність дорівнює

$$N = \frac{A}{t} = \frac{F s}{t} = F v,$$

де  $s$  – шлях, який проходить тіло за час  $t$ , рухаючись зі швидкістю  $v = s/t$ .

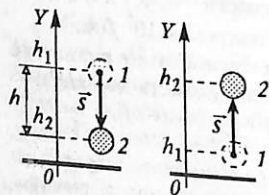
Під час руху автомобіля зі сталою швидкістю його сила тяги рівна за модулем силі опору. Тому з формули  $N=Fv$  видно, що за сталої сили опору швидкість транспортного засобу прямо пропорційна потужності двигуна.

### Робота сил тяжіння, пружності та тертя

На невеликих відстанях від поверхні Землі сила тяжіння є сталою:  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ . Якщо тіло масою  $m$  вільно падає з висоти  $h_1$  над поверхнею Землі до висоти  $h_2$ , напрями переміщення та сили тяжіння збігаються і відповідно до (28) робота сили тяжіння дорівнює

$$A = mg(h_1 - h_2). \quad (30)$$

Можна довести, що не тільки в розглянутому випадку, а й завжди робота сили тяжіння дорівнює добутку модуля сили тяжіння на різницю висот у початковому та кінцевому положеннях. Відповідно до формули (30) під час руху вниз робота сили тяжіння додатна (мал. 51а), під час руху вгору – від'ємна (мал. 51б).



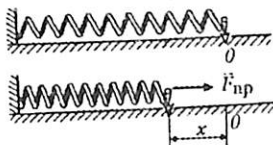
Мал. 51

Роботу сили пружності визначають за формулою

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}, \quad (31)$$

де  $k$  – жорсткість;  $x_1$ ,  $x_2$  – початкова та кін-

цева координати вільного кінця деформованого стержня або пружини (початок координатної осі  $Ox$  збігається з вільним кінцем недеформованого стержня, мал. 52).



Мал. 52

Якщо тіло повертається до положення рівноваги, значення деформації зменшується:  $|x_2| < |x_1|$ ; при цьому відповідно до (31) робота сили пружності додатна. Якщо ж недеформоване тіло розтягується або стискається,  $|x_2| > |x_1|$  і робота від'ємна.

**Робота сили тертя.** Під час прямолінійного руху напрям вектора переміщення  $\vec{s}$  завжди збігається з напрямом вектора швидкості  $\vec{v}$ , а сила тертя спрямована в протилежний бік. Тому робота сили тертя завжди від'ємна і дорівнює добутку модуля сили тертя на модуль переміщення:

$$A = -F_{\text{тер}} s.$$

**Консервативні сили.** Робота сил тяжіння та сил пружності не залежить від форми траєкторії руху тіла, а визначається тільки переміщенням. Сили, які мають таку властивість, називаються *консервативними*. Сили тяжіння та пружності – консервативні сили. Сили тертя – неконсервативні, їхня робота залежить від форми траєкторії.

## Механічна енергія

Енергією називають загальну кількісну міру руху і взаємодії всіх видів матерії. У фізиці розглядають різні форми енергії: механічну, внутрішню, хімічну, електромагнітну, гравітаційну, ядерну тощо.

Зміна енергії завжди пов'язана з виконанням роботи, тому кажуть, що *енергія — це величина, що вказує на здатність тіл виконувати роботу.*

Під час виконання роботи завжди є сили дії й протидії, які за третім законом Ньютона рівні за модулем й протилежні за напрямом. Тому й роботи, виконані цими силами, однакові за модулем і протилежні за знаком. Для обох випадків справедаливе твердження: *зміна енергії завжди дорівнює за модулем виконаній роботі,*

$$|A| = |W_2 - W_1|. \quad (32)$$

Одночасно з означенням енергії формула (32) найповніше розкриває фізичний зміст поняття "робота": *робота є мірою зміни енергії.* Робота додатна, якщо в процесі її виконання енергія тіла підвищується,  $W_2 > W_1$ , і від'ємна, якщо енергія зменшується,  $W_2 < W_1$ .

Енергію позначають літерами  $E$  або  $W$  і вимірюють в тих самих одиницях, що й роботу, тобто у джоулях.

*Енергія — величина відносна:* енергія даного тіла матиме неоднакові значення в різних системах відліку. Проте зміна енергії, тобто різниця її значень у двох станах ( $W_2 - W_1$ ), — абсо-

лютна, вона завжди дорівнює виконаній роботі:  $A = W_2 - W_1$ .

*Механічна енергія* — енергія механічного руху і взаємодії тіл системи або їх частин, яка дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій цієї системи. *Повна механічна енергія* тіла дорівнює сумі його кінетичної  $W_k$  та потенціальної  $W_p$  енергій:

$$W = W_k + W_p.$$

*Кінетичною енергією* називають енергію, яку має тіло внаслідок свого руху; її визначають за формулою:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

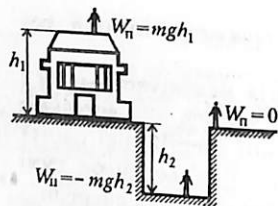
Якщо на тіло під час руху діє сила (або одночасно кілька сил), кінетична енергія тіла змінюється — тіло прискорюється або зупиняється. При цьому

робота сили або рівнодійної сил, прикладених до тіла, дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, \text{ або } A = \Delta W_k. \quad (33)$$

Останнє твердження із формулою (33), що його виражає, називають *теоремою про кінетичну енергію.*

*Потенціальна енергія* — це енергія взаємодії тіл, що залежить від взаємного розміщення тіл або частин одного й того самого тіла (тіло, під-



Мал. 53

няте над Землею, розтягнена або зтиснена пружина, зтиснений газ тощо).

Потенціальна енергія тіла масою  $m$ , піднятого на висоту  $h$  над Землею, дорівнює:

$$W_{\text{п}} = mgh, \quad (34)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння. Ця формула справедлива, якщо поверхню Землі вважати за нульовий рівень відліку енергії, тобто на поверхні Землі потенціальна енергія дорівнює нулеві (мал. 53). Вважають також, що у формулі (34) відстані  $h$  від поверхні Землі невеликі порівняно з її радіусом:  $h \ll R_{\text{з}}$ .

Тепер формулу (30), що визначає роботу сил тяжіння, можна подати у такому вигляді:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1) = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -\Delta W_{\text{п}}.$$

Отже,

робота сил тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятій з протилежним знаком.

Потенціальну енергію стисненої або розтягнутої пружини визначають за формулою:

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

де  $k$  – жорсткість,  $x$  – видовження (стиснення) пружини. Формулу (31), що визначає роботу сил пружності, можна подати у вигляді:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right) = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -\Delta W_{\text{п}}.$$

Отже,

робота сил пружності дорівнює зміні потенціальної енергії пружно деформованого тіла, взятій з протилежним знаком.

### Закон збереження енергії

Завдяки численним експериментам встановлено, що в замкненій системі, в якій відсутні сили тертя, повна механічна енергія (тобто сума кінетичної і потенціальної енергій усіх взаємодіючих тіл) не змінюється з часом. Енергії одних тіл можуть зростати, інших – зменшуватися, але повна енергія залишається незмінною. Це твердження становить зміст закону збереження механічної енергії, який формулюють так:

в будь-який момент часу повна механічна енергія замкненої системи тіл, взаємодіючих силами тяжіння та пружності, залишається сталою (зберігається) за будь-яких переміщень тіл системи:

$$W_{\text{к}} + W_{\text{п}} = \text{const}, \text{ або } W_{\text{к}1} + W_{\text{п}1} = W_{\text{к}2} + W_{\text{п}2}.$$

Якщо в системі разом із силами тяжіння і пружності діють сили тертя або опору, повна механічна енергія зменшується. Внутрішня ж енергія системи взаємодіючих тіл при цьому збільшується (тіла нагріваються). Зменшення механічної енергії точно дорівнює збільшенню внутрішньої. Отже, коли між тілами замкненої системи діють сили будь-якої природи, справедливий закон збереження повної енергії в природі:

енергія не виникає та не зникає, а тільки перетворюється з одного виду в інший в еквівалентних кількостях.

Закон збереження енергії – це фундаментальний закон природи. Основний його зміст полягає не тільки у встановленні факту збереження повної енергії, але й у розумінні можливості взаємних перетворень різних видів енергії з одного виду в інший в однаковій кількості.

### Коефіцієнт корисної дії (ККД)

Кожна машина, кожний двигун характеризується коефіцієнтом корисної дії (скорочено ККД), який показує, наскільки ефективно використовується енергія, що підводиться до машини. Коефіцієнт корисної дії дорівнює відношенню корисної роботи  $A_k$ , яка виконується машиною, до всієї виконаної (повної) роботи  $A_{пов}$ :

$$\eta = \frac{A_k}{A_{пов}} \text{ або } \eta = \frac{A_k}{A_{пов}} \cdot 100\%$$

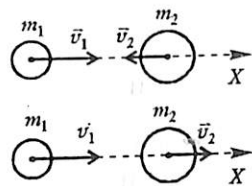
Оскільки  $A = Nt$ , то можна записати:

$$\eta = \frac{N_k}{N_{пов}} \text{ або } \eta = \frac{N_k}{N_{пов}} \cdot 100\%$$

де  $N_k$  – корисна, а  $N_{пов}$  – повна потужність. Значення ККД завжди менше від одиниці.

### Абсолютно пружний та абсолютно непружний удари

Абсолютно пружним ударом називають зіткнення двох тіл, при якому сума їх кінетичних енергій не змінюється. Під час центрального удару абсолютно пружних куль їхні швидкості до удару  $\vec{v}_1$  та  $\vec{v}_2$  напрямлені го-



Мал. 54

ризоньтально вздовж прямої, що сполучає центри куль. Після удару кулі рухатимуться вздовж тієї самої прямої зі швидкостями  $\vec{u}_1$  та  $\vec{u}_2$  (мал. 54).

Виберемо координатну вісь  $OX$  в напрямі вздовж цієї прямої і позначимо проекції швидкостей без індексу  $x$ :  $v_{1x} = v_1$ ,  $v_{2x} = v_2$ ;  $u_{1x} = u_1$ ,  $u_{2x} = u_2$ . Закон збереження імпульсу для абсолютно пружного удару в проекції на вісь  $OX$  запишеться так:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (35)$$

В рівнянні (35) значення проекцій швидкостей  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  беруть зі знаком плюс, якщо куля



рухається в додатньому напрямі осі  $OX$ , або із знаком мінус, якщо напрям руху протилежний.

Запишемо тепер закон збереження механічної енергії для абсолютно пружного удару:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (36)$$

Розглядаючи рівняння (35) і (36) як систему і розв'язуючи її відносно невідомих  $u_1$  та  $u_2$ , матимемо:

$$u_1 = -v_1 + 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}; \quad u_2 = -v_2 + 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

**Абсолютно непружним ударом** називають удар, після якого два тіла масами  $m_1$  і  $m_2$ , що рухалися зі швидкостями  $\vec{v}_1$  та  $\vec{v}_2$ , рухатимуться разом або перебуватимуть у стані спокою. Закон збереження імпульсу для абсолютно непружного удару

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}$$

дає можливість визначити загальну швидкість  $\vec{u}$  двох тіл після удару:

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

Закон збереження повної енергії для абсолютно непружного удару записується у вигляді:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) u^2}{2} + \Delta W_{\text{вн}},$$

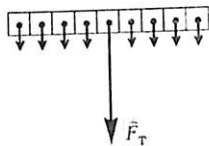
де  $\Delta W_{\text{вн}}$  — та частина енергії куль, яка під час удару перетворюється у внутрішню.

## Розділ 4. Статика

### Рівновага. Центр тяжіння. Центр мас

**Статика** — розділ механіки, в якому вивчаються умови рівноваги тіла під дією прикладених до нього сил. **Рівновагою** називають стан тіла, при якому воно або перебуває в спокої, або рухається рівномірно або прямолінійно, або рівномірно обертається навколо осі, що проходить через його центр тяжіння.

**Центр тяжіння твердого тіла** — це точка прикладання сили тяжіння, що діє на тіло. До центра тяжіння прикладена рівнодійна сил тяжіння всіх частинок, з яких складається тіло (мал. 55).



Мал. 55

**Центр мас**, або **центр інерції**, — точка, в якій може вважатися зосередженою маса тіла під час його поступального руху. В однорідному гравітаційному полі центр тяжіння і центр мас збігаються.

Якщо лінії дії прикладених до тіла сил проходять через його центр мас (як показано на мал. 56), то таке тіло рухатиметься тільки поступально. Зрозуміло, що рух тіла під дією сили можна розглядати як рух матеріальної точки тоді і тільки тоді, коли лінія дії сили проходить через центр мас системи.

Таким чином, **центр мас** — точка, в якій вважатиметься зосередженою маса тіла під час його поступального руху.

Якщо тіло має правильну геометричну форму, то його центр мас збігається з геометричним центром даної фігури. Він може міститись як усередині, так і зовні тіла. Наприклад, центр мас труби міститься на її осі, стільця – десь під його сидінням.

Координата центра мас  $x_c$  системи матеріальних точок масами  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , розміщених на одній прямій, визначаються за формулою

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – координати точок.

### Умови рівноваги тіла

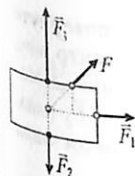
За першим законом Ньютона стан спокою тіла або його поступальний рух можливі тільки за умови, коли прикладені до тіла сили компенсують одна одну. Тому першу умову рівноваги формулюють так:

тверде тіло, яке не обертається, перебуває в рівновазі, якщо рівнодійна всіх прикладених сил (тобто їх векторна сума) дорівнює нулеві:

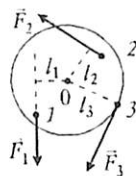
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0.$$

Тіло, що має закріплену вісь обертання, не може рухатися поступально. Під дією сили таке тіло лише обертатиметься навколо нерухомої осі.

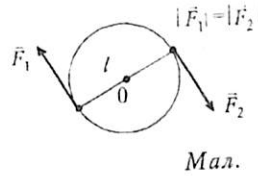
Обертальна дія сили залежить не тільки від її значення, а й від відстані між віссю і прямою,



Мал. 56



Мал. 57



Мал. 58

вдвож якої діє сила. Найкоротша відстань від осі обертання до цієї прямої називається *плечем сили*. Отже, плече сили – це довжина перпендикуляра, проведеного від осі обертання до лінії дії сили. На мал. 56 плечі сил позначені літерами  $l_1, l_2, l_3$ .

*Моментом сили M* називають величину, що характеризує обертальну дію сили; числове значення моменту сили дорівнює добутку сили на плече:

$$M = Fl.$$

Одиниця моменту сили – ньютон на метр (Н · м).

Другу умову рівноваги формулюють так:

тверде тіло, яке має закріплену (нерухому) вісь обертання, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів сил  $M_i$  дорівнює нулю, тобто сума моментів сил, які обертають тіло проти годинникової стрілки (додатних), дорівнює сумі моментів, які обертають тіло за годинниковою стрілкою (від'ємних):

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = M_1' + M_2' + \dots + M_n'.$$

**Пара сил.** Коли тіло намагається повернути навколо осі, що проходить через його центр мас, до нього прикладають *пару сил* – дві рівні за модулем і протилежні за напрямом сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (мал. 58). Пара сил характеризується *моментом пари*  $M$ , причому

$$M = F_1 d = F_2 d,$$

де  $d$  – найкоротша відстань між лініями дії сил пари, яку називають *плечем пари*.

### Додавання паралельних сил.

#### Рівновага під дією паралельних сил

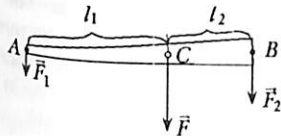
Візьмемо якесь видовжене тіло, наприклад, дощечку, і прикладемо до неї з протилежних боків дві паралельні сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (мал. 59). Припустімо, що дощечка під дією цих сил рухається поступально. Це може бути тоді і тільки тоді, коли рівнодійна сил проходить через центр мас тіла (точку  $C$ ). Оскільки тіло під дією рівнодійної  $\vec{F}$  рухається поступально (отже, не обертається), модулі моментів сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  відносно точки  $C$  дорівнюють один одному:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2,$$

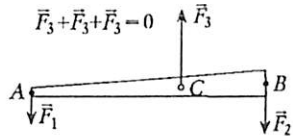
де  $l_1$  і  $l_2$  – плечі сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ . З останньої рівності маємо співвідношення:

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

Оскільки сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  напрямлені в один бік,



Мал. 59



Мал. 60

очевидно, що модуль сили  $\vec{F}$  дорівнює сумі модулів сил, які додаються:

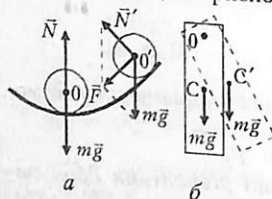
$$F = F_1 + F_2.$$

Отже, можна твердити, що *рівнодійна двох паралельних сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , напрямлених в один бік, спрямована в той самий бік; модуль рівнодійної дорівнює сумі модулів сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , а точка, в якій прикладена ця рівнодійна, ділить відстань між точками прикладання сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  на частини, довжини яких ( $l_1$  і  $l_2$ ) обернено пропорційні цим силам (мал. 59).*

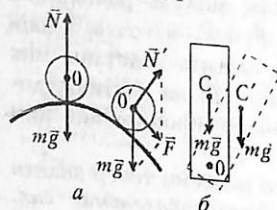
На підставі вищесказаного можемо тепер знайти умову рівноваги тіла під дією паралельних сил. Очевидно, дощечка, що зображена на мал. 59, перебуватиме в рівновазі, якщо до неї крім сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  прикласти третю силу  $\vec{F}_3$ , яка врівноважує рівнодійну сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ . Очевидно, такою силою буде сила  $\vec{F}_3$ , зображена на мал. 60, яка дорівнює  $\vec{F}_3 = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)$ . Отже,

незакріплене тіло перебуває в рівновазі під дією трьох паралельних сил  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ ,  $\vec{F}_3$  у тому випадку, коли третя сила ( $\vec{F}_3$ ) напрямле-

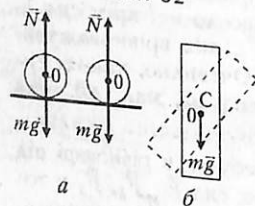
на в бік, протилежний першим двом, за значенням дорівнює сумі їх модулів і прикладена в точці, що ділить відстань між точками прикладання сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  у відношенні, оберненому відношенню їх модулів.



Мал. 61



Мал. 62



Мал. 63

### Види рівноваги

*Стійкою рівновагою* називають стан, коли за незначного відхилення від положення рівноваги виникає рівнодійна сила, яка повертає тіло до положення рівноваги (мал. 61). Тіло, виведене з положення рівноваги, повертається назад. Стійка рівновага — це стан з мінімальною потенціальною енергією.

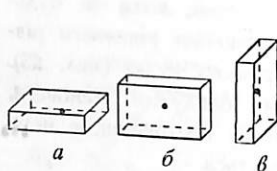
*Нестійка рівновага* — стан, коли за незначного відхилення тіла від положення рівноваги виникає рівнодійна сила, напрямлена від положення рівноваги (мал. 62). Тіло, виведене з положення рівноваги, не повертається назад. Нестійка рівновага — це стан з максимальною потенціальною енергією.

*Байдужа рівновага* — стан, коли за будь-якого зміщення тіла від положення рівноваги рівнодійна сила залишається рівною нулю (мал. 63). Тіло, виведене з положення байдужої рівноваги, перебуває у рівновазі в новому положенні, а його потенціальна енергія не змінюється.

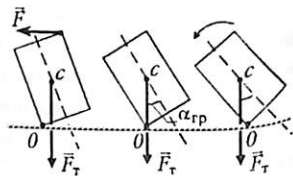
### Рівновага тіла, яке має опору

Порівнюючи розглянуті умови стійкої і нестійкої рівноваги, можна помітити загальну для всіх випадків *умову стійкої рівноваги* або *умову стійкості*: для того, щоб рівновага була стійкою, центр тяжіння тіла мусить займати найнижче з усіх можливих сусідніх положень. Ця умова повинна виконуватись і в тому разі, коли тіло спирається не на одну точку, а на кілька або на плоску грань. Одне й те саме тіло у формі прямокутного паралелепіпеда, що лежить на горизонтальній площині (мал. 64) в різних положеннях *a*, *b*, *в*, щоразу перебуває в стійкій рівновазі, але стійкість його найбільша в першому положенні, тому що центр ваги в цьому випадку розташований нижче.

*Мірою стійкості* такого тіла є сила, яка потрібна, щоб перевернути тіло навколо одного з ребер основи. Під дією такої сили воно повертається навколо ребра до положення, при якому вертикальна лінія, проведена з центра ваги, проходить через вісь обертання (мал. 65). Після проходження цього положення (положення не-



Мал. 64

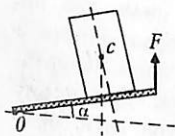


Мал. 65

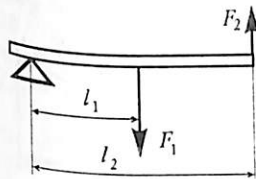
стійкої рівноваги) центр ваги опускатиметься вниз. Тіло перевернеться навколо ребра.

Міру стійкості тіла, що спирається на опору, можна також оцінювати за значенням *граничного кута відхилення*  $\alpha_{гр}$ . Якщо тіло лежить на певній своїй грані і його потрібно перевернути навколо ребра, його повертають навколо цього ребра на кут  $\alpha_{гр}$ , після чого тіло саме перекинеться на іншу грань під дією сили тяжіння (мал. 65).

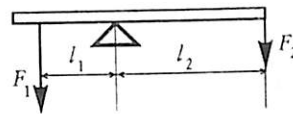
Якщо нахилити опору, на якій стоїть тіло, то при значному терті між опорою і тілом воно зберігатиме стійку рівновагу і стоятиме на опорі. Але рівновага буде стійкою і тіло стоятиме доти, доки вертикальна пряма, проведена через центр тяжіння, перетинатиме площу опори (мал. 66). Певна річ, значення кута, до якого треба нахилити опору, щоб перевернути тіло, дорівнює значенню граничного кута відхилення  $\alpha_{гр}$  для цього тіла.



Мал. 66



Мал. 67



Мал. 68

**Умови рівноваги простих механізмів**

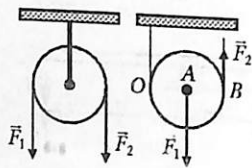
*Прості механізми* – це пристрої, що дають змогу використовувати меншу за величиною чи інакше напрямлену силу для врівноваження даної сили або для виконання роботи. До простих механізмів відносять важіль, блок, похилу площину, клин, гвинт, ворот та ін.

Експериментально встановлено: усі прості механізми не дають виграшу в роботі – за їх допомогою можна змінити лише значення сили або її напрям. *Золоте правило механіки* полягає в тому, що

за допомогою простого механізму не можна дістати виграшу в роботі (інакше: у скільки разів виграємо у силі, в стільки разів програємо у відстані).

**Рівновага важеля.** *Важіль* – будь-яке тіло, що має вісь обертання, до якого прикладені сили, які повертають його у різні боки. (На мал. 67 показано *однобічний важіль*, а на мал. 68 – *двобічний*).

Нехай важіль під дією сил  $F_1$  і  $F_2$  перебуває у рівновазі. Вісь обертання проходить через точку  $O$ . Для рівноваги важеля потрібно, щоб момент



Мал. 69 Мал. 70

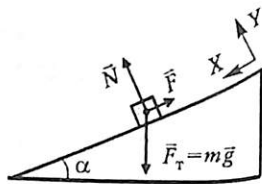
сили  $F_1$  дорівнював моменту сили  $F_2$ , але напрямки моментів мають бути протилежними. Якщо відрізки  $l_1$  і  $l_2$  перпендикулярні до напрямків сил  $F_1$  і  $F_2$ , то вони є плечами цих сил. Отже, умова рівноваги важеля така:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2, \quad \text{або} \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Якщо до одного кінця важеля прикладена сила  $F_1$ , її можна врівноважити силою  $F_2$ , прикладеною до іншого кінця важеля, яка за значенням буде меншою, ніж сила  $F_1$ , у стільки разів, у скільки разів плече  $l_2$  більше, ніж плече  $l_1$ .

**Нерухомий і рухомий блоки.** Блок – це колесо з жолобком, через який перекинута нитка (мотузка, трос). *Нерухомим* називають блок, вісь якого нерухома (сам блок може обертатися навколо цієї осі, мал. 69). Для піднімання вантажу слід прикласти таку саму силу, як і без блока. Такий блок не дає виграшу в силі, він застосовується для зміни напрямку сили.

При підніманні вантажу за допомогою *рухомого* блока (мал. 70) дістаємо подвійний вигреш у силі,



Мал. 71

тому що плече  $OA$  сили  $F_1$  удвічі менше від плеча  $OB$  сили  $F_2$  натягу троса. При витягуванні троса на довжину  $l$  вантаж піднімається лише на висоту  $l/2$ , отже, рухомий блок не дає виграшу в роботі.

**Похила площина.** На мал. 71 зображено тіло, що утримується на гладенькій похилій площині силою  $F$ , прикладеною паралельно цій площині. З малюнка видно, що за відсутності сил тертя сила  $F$  за модулем має дорівнювати проекції сили тяжіння  $F_T = mg$  на вісь  $OX$ :  $F = F_T \sin \alpha$ . Враховуючи, що  $\sin \alpha = h/l$ , отримуємо  $F = F_T \cdot h/l$ , або

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

Отже, умову рівноваги тіла на похилій площині можна сформулювати так:

щоб тіло, що лежить на похилій площині, перебувало у стані спокою або рівномірного руху вздовж неї (без тертя), слід прикласти силу  $F$ , паралельну похилій площині, яка у стільки разів менша від сили тяжіння  $F_T$ , у скільки разів висота похилої площини  $h$  менша від її довжини  $l$ .

**Клин** – різновидність похилої площини. Він становить основну частину інструментів для різання, коління, стругання, тощо: ножиць, сокири, стамески, лемеша плуга та ін.

**Гвинт** – циліндричне тіло з різью, яку роблять по гвинтовій лінії. Якщо нехтувати тертям, то при рівновазі гвинта сила, що діє по дотичній до кола головки гвинта, у стільки разів менша за силу, що діє на гвинт вздовж його осі, у скільки разів крок гвинта менший за довжину кола головки гвинта.

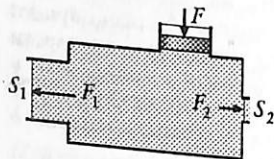
## Розділ 5. Гідро- і аеродинаміка

### Закон Паскаля. Тиск у рідині

Щоб характеризувати дію сили на кожну одиницю площі поверхні, в механіці користуються спеціальною величиною, яку називають *тиском*. Тиск – скалярна величина, що дорівнює силі, яка діє на одиницю площі перпендикулярно до цієї поверхні:

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

Одиниця тиску в СІ – паскаль (Па):  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ . 1 Па дорівнює тиску, при якому на 1 м<sup>2</sup> площі поверхні діє сила 1 Н.

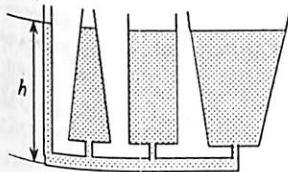


Мал. 72

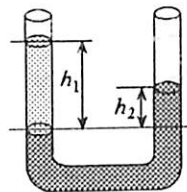
Сили тиску в рідині – це сили пружності, які виникають під час стискування рідини. Сили тиску в газі зумовлені ударами молекул зі стінками посудини. Рідина (чи газ) створює тиск не тільки на дно і стінки посудини – всередині рідини теж діють сили тиску.

Для рідин і газів експериментально встановлено закон Паскаля:

рідина або газ, що містяться в посудині, передають зовнішній тиск, який чиниться на них, в усіх напрямках однаково (мал. 72).



Мал. 73



Мал. 74

**Гідростатичний тиск.** Сила тяжіння рідини спричинює тиск на дно і стінки посудини або на занурені в рідину тіла. Якщо деяка площина міститься в рідині на глибині  $h$ , на неї зверху тисне стовп рідини висотою  $h$ . Тиск у рідині, зумовлений силою її тяжіння, називають *гідростатичним*. Його значення прямо пропорційне глибині занурення і визначається за формулою:

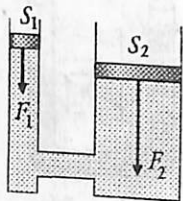
$$p = \rho gh,$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $h$  – глибина занурення або висота стовпа рідини,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

**Повний тиск у рідині на глибині  $h$**  дорівнює сумі атмосферного  $p_0$  та гідростатичного тисків:

$$p = p_0 + \rho gh.$$

**Сполучені посудини.** Сполученими називають посудини, що з'єднані між собою у нижній частині каналом, по якому рідина може перетікати з однієї такої посудини в іншу. В сполучених посудинах незалежно від їхньої форми та маси налитої рідини рівні однорідної рідини встановлюються на одній і тій самій висоті (мал. 73).



Мал. 75

Різнорідні речовини в сполучених посудинах встановлюються таким чином, що висоти стовпчиків рідин над рівнем поділу обернено пропорційні їхнім густинам (мал. 74):

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

### Гідравлічні машини (гідравлічний прес)

Закон Паскаля покладено в основу дії гідравлічних машин, тобто машин, у яких використовується рідина (від грецьк. *гідравлікос* – водяний). Силу  $F_2$ , що діє на правий поршень гідравлічної машини, можна урівноважити значно меншою силою  $F_1$ , прикладеною до лівого поршня (мал. 75); при цьому

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

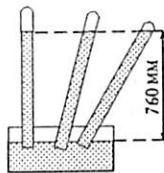
де  $S_1, S_2$  – площі поршнів.

Під дією сили  $F_1$  малий поршень опускається на висоту  $h_1$  (хід поршня); при цьому великий поршень піднімається на висоту  $h_2$ . Внаслідок практичної нестисливості рідини об'єми її, що перейшли з одного циліндра в інший, однакові:  $S_1 h_1 = S_2 h_2$ . Звідси  $h_1 / h_2 = S_2 / S_1 = F_2 / F_1$ . Отже, скільки ми виграємо в силі, стільки програємо у відстані, і виграшу в роботі гідравлічний прес не дає (*золоте правило механіки*):

$$A_1 = F_1 h_1 = A_2 = F_2 h_2.$$

### Атмосферний тиск

Атмосферний тиск – це тиск на тіла, спричинений силою тяжіння атмосферного повітря. Вперше виміряв атмосферний тиск італійський вчений Торрічеллі. Дослід Торрічеллі (1634р.) свідчить, що тиск стовпчика ртуті певної висоти врівноважує тиск атмосфери (мал. 76).



Мал. 76

Нормальним атмосферним тиском називають тиск атмосферного повітря на рівні моря, врівноваженого при  $0^\circ\text{C}$  стовпчиком ртуті заввишки 760 мм. Значення нормального атмосферного тиску  $p_0$  приблизно дорівнює 100 кПа; часто його виражають і в позасистемних одиницях – фізичних атмосферах (*атм*) або міліметрах ртутного стовпчика (мм рт. ст.):

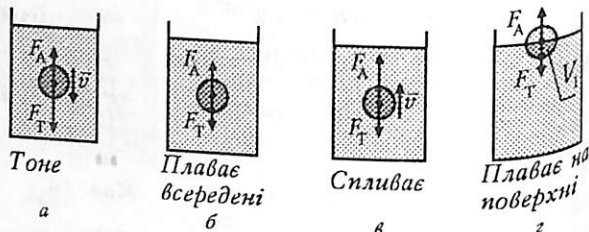
$$p_0 = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Прилад, що вимірює атмосферний тиск, називають *барометром*. Атмосферний тиск поблизу поверхні Землі під час підйому на кожні 8 м знижується на 1%. За спадом тиску під час підйому вгору можна визначити висоту підйому. Барометр, на шкалі якого замість паскалів чи міліметрів ртутного стовпа нанесено показники в метрах висоти підйому, називають *висотоміром*, або *альтиметром*.

### Закон Архімеда

При зануренні тіла в рідину (або газ) на нього з усіх боків діють сили тиску, при цьому сила тиску знизу більша, ніж зверху. Різниця цих сил створює





Мал. 77

т.зв. виштовхувальну силу (силу Архімеда), яка діє вгору і прикладена до центра ваги витісненої рідини.

Закон Архімеда формулюють так:

рідина (або газ) діє на занурене в неї тіло з виштовхувальною силою, яка чисельно дорівнює силі тяжіння витісненої тілом рідини (газу) і напрямлена вгору.

Виштовхувальну силу називають *силою Архімеда*. Вона прикладена до центра тяжіння витісненого об'єму рідини і прямо пропорційна густині  $\rho$  рідини (газу) й об'єму витісненої рідини  $V_1$ :

$$F_A = \rho g V_1,$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння. Об'єм витісненої рідини  $V_1$  дорівнює об'єму всього тіла, якщо воно повністю занурене в цю рідину, або об'єму тієї частини тіла, що занурена в рідину.

**Умови плавання тіл.** Закон Архімеда лежить в основі плавання тіл. Плавання – це стан рівноваги твердого тіла, частково чи повністю зануреного в рідину (мал. 77). Очевидно, тіло плаває за умов, якщо сила тяжіння врівноважується виштовхувальною силою, тобто їх рівнодійна дорівнює нулеві.

Неважко довести, що однорідне тіло тоне, якщо його густина  $\rho$  більша від густини рідини  $\rho_p$  і спливає в протилежному разі. Умови плавання тіл пояснює мал. 77, де показано три якісно різні випадки:

1.  $\rho_p < \rho \Rightarrow F_A < F_T \Rightarrow$  тіло тоне (мал. 77а);
2.  $\rho_p = \rho \Rightarrow F_A = F_T \Rightarrow$  тіло повністю занурене в рідину (мал. 77б) і перебуває в ній у завислому стані (стані байдужої рівноваги);
3.  $\rho_p > \rho \Rightarrow F_A > F_T \Rightarrow$  тіло спливає на поверхню (мал. 77в).

На поверхні рідини об'єм зануреної частини тіла зменшується до величини  $V_1$  (мал. 77г), отже, зменшується сила Архімеда до значення  $F_{A1}$ ; вона стає рівною за модулем силі тяжіння  $F$ :

$$F_{A1} = F, \text{ або } \rho_p g V_1 = \rho g V,$$

де  $\rho_p$  та  $\rho$  – густини рідини і тіла,  $V$  – об'єм усього тіла, а  $V_1$  – його частини, зануреної у воду. З останньої рівності добуваємо співвідношення:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{\rho}{\rho_p}.$$

Тепер можна сформулювати *умову плавання однорідного тіла на поверхні рідини*:

тіло плаває на поверхні, коли його сила тяжіння врівноважується виштовхувальною силою; при цьому нижче рівня рідини міститься така частина  $V_1$  від усього об'єму тіла  $V$ , яка дорівнює відношенню густин тіла  $\rho$  і рідини  $\rho_p$ .

## Рух рідини по трубах

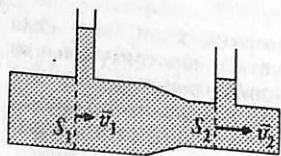
**Ідеальна рідина. Рівняння нерозривності.** Розглянемо *стаціонарну* течію рідини по трубах (коли в кожній точці труби з рухомою рідиною швидкість її з часом не змінюється). При цьому нехтуватимемо силами в'язкого тертя і вважатимемо рідину *ідеальною* – такою, в якій не відбувається втрат механічної енергії. Вважатимемо також рідину *нестисливою*. (Густина такої рідини однакова в кожній точці простору труби).

Під час стаціонарного руху рідини по трубі змінного перерізу через кожний переріз (мал. 78) за певний інтервал часу  $\Delta t$  пройдуть однакові маси рідини, які мають однакові об'єми:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t \Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2.$$

Останню рівність називають *рівнянням нерозривності* потоку і скорочено записують  $Sv = \text{const}$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу в будь-якому місці труби,  $v$  – швидкість руху рідини у цьому перерізі. Отже, під час стаціонарної течії рідини швидкості  $v_1$  і  $v_2$  її частинок у двох довільних перерізах труби обернено пропорційні до площ цих перерізів  $S_1$  і  $S_2$ :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$



Мал. 78

Найбільша швидкість течії рідини спостерігається в найвужчому перерізі труби, а найменша – в найширшому.

**Рівняння Бернуллі** – одне з основних рівнянь гідродинаміки, яке зв'язує зміну тиску  $p$  в потоці ідеальної рідини із зміною швидкості течії  $v$  і висоти  $h$  розміщення частинок рідини над площиною відліку. Для будь-яких перерізів труби (мал. 79) виконується рівність

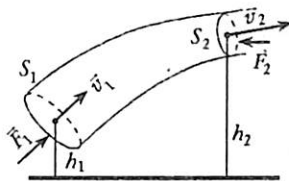
$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const},$$

яку і називають *рівнянням Бернуллі*. В ньому  $\rho$  – густина рідини,  $p$  – статичний тиск. Усе рівняння виражає для рухомої рідини закон збереження механічної енергії. Для горизонтальної труби рівняння Бернуллі спрощується:

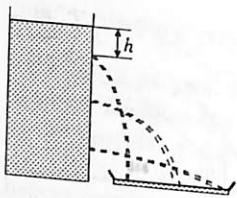
$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}, \text{ або } \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2.$$

**Закон Бернуллі** формулюють так:

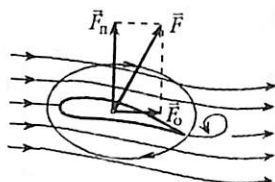
тиск рідини, яка тече в трубі, більший у тих частинах труби, де швидкість течії менша, і, навпаки, в тих частинах, де швидкість течії більша, тиск менший ( $v_2 > v_1 \Rightarrow p_2 < p_1$ , мал. 79).



Мал. 79



Мал. 80



Мал. 81

З рівняння Бернуллі можна вивести формулу Торрічеллі, яка дає можливість визначити швидкість витікання рідини з малого отвору:  $v = \sqrt{2gh}$ , де  $h$  – відстань від отвору до верхнього рівня рідини (мал. 80).

**Піднімальна сила крила літака.** Закон Бернуллі пояснює виникнення піднімальної сили крила літака (мал. 81). В системі крило – набігаючий потік повітря виникає циркуляція повітря, тобто його вихровий рух навколо профілю крила за годинниковою стрілкою. Внаслідок цього результуюча швидкість потоку повітря над крилом буде більша, ніж під крилом, отже, тиск над верхньою поверхнею буде менший, ніж під нижньою. Перепад тисків зумовлює силу  $F$ , що діє на крило. Її вертикальна складова є піднімальною силою, а горизонтальна – силою опору. Остання врівноважується силою тяги літака.

## Частина 2. Молекулярна фізика. Теплові явища

### Розділ 1. Молекулярно-кінетична теорія

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини та їх дослідне обґрунтування

Молекулярна фізика вивчає явища, зумовлені рухом і взаємодією молекул речовини. В основі молекулярно-кінетичної теорії будови речовини лежать такі положення:

1. Будь-яка речовина складається з маленьких частинок: молекул, атомів, іонів. Частинки розташовані не щільно, між ними є проміжки. Це підтверджують такі факти: а) тіла стискаються та розширюються; б) вони взаємно проникають одне в одне (дифузія речовин).

2. Частинки, з яких складається речовина, неперервно та безладно (хаотично) рухаються. Це положення підтверджують явища дифузії речовини, броунівського руху та ін.

3. Частинки речовини взаємодіють одна з одною. Між ними діють сили притягання та відштовхування. Прикладів, що підтверджують це, дуже багато: важко роз'єднати дві поліровані металічні пластини; тверді та рідкі тіла дуже важко стиснути тощо.

## Дифузія. Броунівський рух

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії отримали підтвердження в численних дослідах; найвідоміші з них – явища дифузії та броунівського руху.

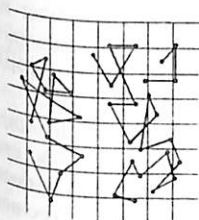
Дифузією називають явище проникнення молекул однієї речовини в проміжки між молекулами іншої. Найлегше відбувається дифузія в газах. Про це свідчить розповсюдження запаху одеколоту або ефіру в кімнаті. В рідинах дифузія відбувається швидше, ніж у твердих тілах, але повільніше, ніж у газах. Її інтенсивність підвищується при нагріванні речовини.

Явище *броунівського руху* відкрите на початку XIX ст. англійським вченим Броуном. Воно полягає в тому, що зважені маленькі тверді і нерозчинні в рідині частинки неперервно і хаотично рухаються (наприклад, квітковий пилок у воді) (мал. 82). Рух броунівської частинки свідчить, що її безперервно штовхають молекули, які оточують її з усіх боків. Внаслідок хаотичного руху молекул їхні удари нескомпенсовані і незначна перевага поштовхів з одного боку надає руху частинкам.

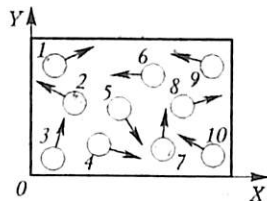
Досліди і спостереження показують, що чим менші розміри броунівських частинок і чим вища температура рідини, в якій вони містяться, тим більша швидкість руху броунівських частинок.

## Рух і взаємодія молекул

*Рух молекул.* Речовина може перебувати в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому і газоподіб-



Мал. 82



Мал. 83

ному. *Агрегатними станами* речовини називають стани однієї і тієї самої речовини, які відрізняються за характером теплового руху частинок (атомів чи молекул). У будь-якому агрегатному стані речовина існує за певних зовнішніх умов (температура, тиск), зміна яких веде до стрибкоподібного переходу з одного агрегатного стану в інший. Такі зміни стану речовини називаються *фазовими переходами*.

В кожному з агрегатних станів рух молекул має свої особливості. В газі відстані між найближчими молекулами набагато більші від їхніх розмірів. Сили взаємодії між молекулами проявляють себе тільки під час зіткнень, а значно більшу частину часу між двома наступними зіткненнями молекули газів не взаємодіють і рухаються за інерцією, тобто прямолінійно і рівномірно (мал. 83). При зіткненнях швидкості молекул змінюються за модулем і напрямом. Кажуть, що рух молекул безладний (хаотичний).

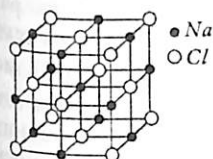
У твердих тілах молекули, створюючи кристалічну решітку, коливаються навколо своїх поло-

жень стійкої рівноваги (мал. 84). Ці коливання виникають тому, що атоми в твердому тілі розміщені впритул, і кожен з атомів оточений з усіх боків найближчими сусідами, ніби він в клітці.

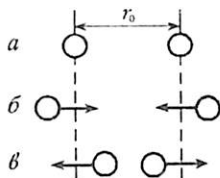
Якщо пригадати, що однойменні електричні заряди відштовхуються, а різнойменні – притягуються, стає зрозуміло, що зближенню атомів перешкоджають взаємні відштовхування електронів (електронних оболонок) сусідніх атомів. Тому сили відштовхування різко зростають, коли атоми настільки зближуються, що їхні електронні оболонки взаємно перекриваються. Якщо ж атоми віддаляються один від одного, вони при цьому наближаються до сусідніх атомів ближче рівноважної відстані, відштовхуються від останніх і повертаються назад, до положення рівноваги. Виникають коливання, які називають *тепловими коливаннями*.

Рідини стосовно теплового руху займають проміжне положення між газами й твердими тілами: кожна молекула рідини деякий час коливається в оточенні сусідніх молекул, потім стрибком переходить в нове положення рівноваги і т. д. Отже, тепловий рух молекул рідини в основному є *коливальним і поступальним*.

Час *осідлого життя* молекули води, тобто час коливань біля одного положення рівноваги при кімнатній температурі, дорівнює в середньому  $10^{-11}$  с. А час одного коливання значно менший ( $10^{-12}$  –  $10^{-13}$  с). Тому молекула здійснює приблизно від 10 до 100 коливань, а потім перескакує з одного осідлого положення в інше. Коли на рідину діє зовнішня сила,



Мал. 84



Мал. 85

перескоки молекули з одного осідлого положення в інше відбуваються переважно в напрямі дії зовнішньої сили. Тому рідини *текучі*, тобто *не зберігають своєї форми*.

**Взаємодія молекул.** Сили взаємодії між молекулами речовини мають електромагнітну природу і діють на дуже малих відстанях, які не перевищують кількох міжатомних відстаней ( $10^{-10}$  –  $10^{-9}$  м). Тому в газах, де відстані між молекулами значно більші від їх розмірів, сили взаємодії між молекулами практично не діють.

У рідинах чи твердих тілах молекули розташовані майже впритул одна до одної, і тому між ними діють сили притягання та відштовхування, причому на малих відстанях переважає відштовхування, а на великих – притягання (мал. 85). Внаслідок цього при розтягу і стиску тіла виникають пружні сили.

### Розміри і маса молекул. Відносна молярна маса

Молекули речовини – це дуже малі частинки матерії, їх не видно навіть в сучасних електронних

мікроскопах зі збільшенням в сотні тисяч разів. Лінійні розміри найменшої за масою молекули – молекули водню – близько  $3 \cdot 10^{-8}$  см, а її маса дорівнює десь  $3,3 \cdot 10^{-24}$  г. Маса і розміри молекул різних речовин відрізняються одні від одних.

Прийнято вимірювати масу молекул у відносних одиницях, тобто у т. зв. *атомних одиницях маси* (а.о.м.). 1 а.о.м. відповідає 1/12 маси одного атома вуглецю (ізоотопу  $^{12}\text{C}$ ).

*Відносна молекулярна (або атомна) маса речовини*  $M_r$  (або  $A_r$ ) – величина, що дорівнює відношенню маси  $m_0$  однієї молекули (чи атома) цієї речовини до 1/12 маси одного атома вуглецю  $m_{0\text{C}}$ :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}}$$

### Кількість речовини. Молярна маса

*Одиниця кількості речовини – моль* – одна з семи основних одиниць СІ. Моль дорівнює кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів (молекул або атомів), скільки атомів міститься в 0,012 кг ізоотопу вуглецю  $^{12}\text{C}$ .

Незалежно від агрегатного стану, моль будь-якої речовини містить одне й те саме число молекул або атомів, яке називають *числом*, або *сталю Авогадро*, і позначають  $N_A$ :

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Така кількість молекул міститься у 0,012 кг ізоотопу вуглецю  $^{12}\text{C}$ .

*Кількість речовини* вимірюється в молях, позначається літерою  $\nu$  і дорівнює відношенню числа молекул  $N$  в даному тілі до числа молекул в 1 молі:

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad (1)$$

*Кількість речовини*  $\nu$  можна визначити як відношення маси  $m$  речовини до його молярної маси  $M$ :

$$\nu = \frac{m}{M} \quad (2)$$

*Молярною масою*  $M$  будь-якої речовини називається маса одного моля цієї речовини. Молярну масу можна знайти як добуток маси однієї молекули  $m_0$  даної речовини на їх кількість в 1 молі:

$$M = m_0 N_A$$

Зручно визначати молярну масу  $M$  через відносну молекулярну масу  $M_r$  за формулою

$$M = 10^{-3} \cdot M_r \text{ кг/моль}$$

Відносні атомні маси наведені біля символу хімічного елементу в періодичній системі елементів Менделєєва. Додавши відносні атомні маси атомів, що входять до складу молекули, можна обчислити відносну молекулярну масу. Так, наприклад, відносна молекулярна маса вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  приблизно дорівнює 44, оскільки відносна атомна

маса вуглецю дорівнює 12, а кисню – приблизно 16:  $12+2 \cdot 16=44$ .

Кількість молекул будь-якої речовини масою  $m$  і молярною масою  $M$  згідно з формулами (1) та (2) дорівнює

$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{M}. \quad (3)$$

## Розділ 2. Властивості газів

Основне рівняння молекулярно – кінетичної теорії ідеального газу

Ідеальний газ – це спрощена модель реального газу, в якій приймається таке:

- розміри молекул набагато менші за відстані між ними;
- сили взаємодії між молекулами відсутні;
- молекули газу, рухаючись безперервно, стикаються між собою і зі стінками посудини як пружні кульки.

За молекулярно-кінетичними уявленнями тиск у газах виникає внаслідок їх пружних зіткнень зі стінками посудини (мал. 86). Розрахунки, проведені на основі молекулярно-кінетичної теорії (МКТ), показують, що тиск газу  $p$  прямо пропорційний масі однієї молекули  $m_0$ , концентрації молекул  $n$  і середньому квадрату швидкості молекул:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}. \quad (4)$$

Це рівняння називають основним рівнянням МКТ ідеального газу. Зауважимо, що концентрацією молекул називають їх кількість в одиниці об'єму,  $n = \frac{N}{V}$ , а середнім

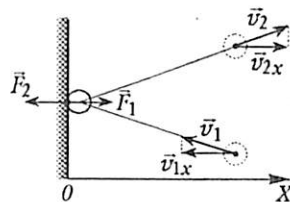
значенням квадрата швидкості молекул  $\overline{v^2}$  – величину, що визначається за формулою

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N},$$

де  $N$  – кількість молекул газу. Якщо ввести величину  $\overline{w}$  – середню кінетичну енергію поступального руху молекул, то основне рівняння МКТ ідеального газу можна записати у вигляді:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{w}. \quad (5)$$

Формули (4) і (5) пов'язують макроскопічну величину – тиск, який характеризує всю сукупність молекул газу і який можна виміряти манометром, з мікроскопічними величинами, що характеризують окремі молекули і не можуть бути безпосередньо виміряні приладами.



Мал. 86

## Температура і її вимірювання

Температура – одна з фізичних величин, що характеризують внутрішній стан тіла. Вона є макроскопічним параметром, тому характеризує всю сукупність молекул, з яких складається тіло.

Досліди показують, що температури тіл, що перебувають у тепловій рівновазі, зрівнюються. Тому про тіла ізольованої системи, котрі мають однакову температуру, кажуть, що вони перебувають у тепловій, або термодинамічній рівновазі.

Таким чином, *температура* – це фізична величина, яка характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи і однакова для всіх частин ізольованої системи в стані термодинамічної рівноваги.

Якщо система не перебуває в рівновазі, то енергія передається від тіл з вищою температурою до тіл з нижчою температурою.

Прилад для вимірювання температури називають *термометром*. Термометр – це якесь "пробне" тіло, що приводиться в контакт з тілом, температуру якого треба виміряти. Термометр фіксує власну температуру, рівну температурі тіла, з котрим він перебуває в термодинамічній рівновазі.

Дія термометрів ґрунтується на однозначній залежності деяких фізичних властивостей пробних тіл від температури. Наприклад, в добре відомих *ртутних* і *спиртових* термометрах використовується лінійна залежність об'єму рідини від тем-

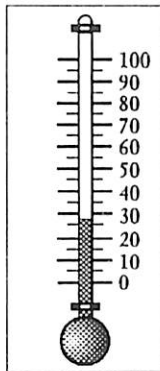
ператури, внаслідок чого висота стовпчика рідини в каналі трубки термометра лінійно зростає при підвищенні температури рідини (мал. 87). В *газових* термометрах про зміну температури судять за зміною тиску газу, в *електричних* – за зміною електричного опору тощо.

Числове значення температури встановлюють як кількість одиниць певної *температурної шкали*. Найвідоміші з них – температурна шкала за Цельсієм і абсолютна температурна шкала (шкала Кельвіна).

*Шкала Цельсія* – це температурна шкала, в якій інтервал між температурами танення льоду і кипіння води за нормального атмосферного тиску поділений на 100 рівних частин, кожна з яких дорівнює 1°С. Температура танення льоду прийнята за 0°С, а температура кипіння води – за 100°С. Температури нижчі за 0°С вважають від'ємними, вищі за 0°С – додатними.

*Абсолютна (термодинамічна) шкала* запропонована англійським фізиком лордом Кельвіном. Інколи її так і називають – шкала Кельвіна. Вона побудована таким чином, що:

1) початок її відліку – *абсолютний нуль температури* – розміщений на 273,15°С нижче нуля температури за шкалою Цельсія;



Мал. 87



2) одиниця абсолютної (термодинамічної) температури дорівнює градусів за шкалою Цельсія.

Абсолютна термодинамічна температура вимірюється в кельвінах (К) і пов'язана з температурою  $t$  шкали Цельсія (С) формулою

$$T = t + 273,15.$$

Зміна температури  $\Delta T$  в кельвінах (К) дорівнює зміні температури  $\Delta t$  в градусах Цельсія (С):

$$\Delta T = \Delta t, \text{ або } T_2 - T_1 = t_2 - t_1.$$

За абсолютною температурною шкалою (шкалою Кельвіна) будь-яка температура додатна. Тобто абсолютний нуль  $-0 \text{ К}$  – це найнижча температура, що існує у Всесвіті і на Землі. Відповідно до уявлень класичної фізики при абсолютному нулі температур енергія теплового (хаотичного) руху молекул і атомів речовини дорівнює нулю.

### Фізичний зміст абсолютної температури

На прикладі ідеального газу з'ясуємо, в чому полягає фізичний зміст абсолютної термодинамічної температури.

Експериментально встановлено, що тиск газу прямо пропорційний концентрації молекул  $n$  і абсолютній температурі  $T$ :

$$p = nkT, \quad (6)$$

де  $n = N/V$  – концентрація молекул газу,  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який називають *сталюю*

Больцмана. Значення  $k$ , встановлене на досліді, дорівнює

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К.}$$

Рівняння (6) називають *рівнянням стану ідеального газу*. Порівнюючи (6) з (5), легко довести, що середня кінетична енергія молекули  $\bar{w}$  пов'язана з абсолютною (термодинамічною) температурою  $T$  формулою

$$\bar{w} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (7)$$

Бачимо, що абсолютна температура прямо пропорційна кінетичній енергії поступального руху молекул,  $T \sim \bar{w}$ . Отже, *фізичний зміст абсолютної (термодинамічної) температури полягає в тому, що вона є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху молекул речовини,  $T \sim \bar{w}$ , як це бачимо з рівняння (7).*

### Швидкості молекул

Внаслідок хаотичного руху молекул і цілком випадкового характеру їх зіткнень в газі в будь-який момент часу є молекули, що рухаються з різними швидкостями. Проте у величезній сукупності молекул газу найчастіше є молекули з цілком певними значеннями швидкості (т. зв. *найімовірніша швидкість*). Наприклад, молекули кисню за кімнатної температури мають найімовірнішу швидкість приблизно 390 м/с. Вперше

експериментально виміряв швидкості окремих молекул газу німецький фізик О. Штерн (1920).

Швидкості молекул газу можна обчислити за формулою (7), з якої

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \quad \text{або} \quad v = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (8)$$

Обчислимо, наприклад, швидкість молекул кисню при 25°C. Підставляємо в (8) значення  $M$ ,  $T$  і  $R$ :  $M=32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $T=298\text{K}$ ,  $R=8,31$  Дж/(моль·К). Маємо:

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31}{32 \cdot 10^{-3}}} \text{ м/с} \approx 482 \text{ м/с}.$$

Значення швидкості молекул газу, обчислені за (8), збігаються з експериментальними результатами (дослід Штерна та ін.). Це є переконливим доказом правильності МКТ ідеального газу.

### Рівняння стану ідеального газу

Стан будь-якого тіла або системи, зокрема і газу, можна визначити кількома макроскопічними величинами, що називають *параметрами стану* (наприклад, об'єм, тиск, температура). Рівняння, яке пов'язує параметри стану в стані термодинамічної рівноваги, називають *рівнянням стану*.

Рівняння (6) є *рівнянням стану ідеального газу* – воно пов'язує тиск, концентрацію і температуру. Якщо врахувати, що концентрація молекул  $n=N/V$ , а кількість молекул визначається фор-

мулою (3), рівнянню (6) можна надати іншого вигляду:

$$\frac{pV}{T} = kN_A \frac{m}{M}. \quad (9)$$

Добуток сталої Больцмана  $k$  на сталу Авогадро  $N_A$  називають *універсальною газовою сталою* і позначають літерою  $R$ :

$$R = kN_A;$$

$$R = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Тепер рівняння (9) можна подати так:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (10)$$

Це рівняння стану для довільної маси ідеального газу, яке називають *рівнянням Клапейрона – Менделєєва*.

Якщо індексом 1 позначити параметри, що стосуються першого стану газу, а індексом 2 – параметри, що відносяться до другого стану, то для даної маси газу

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = R \frac{m}{M} \quad \text{і} \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = R \frac{m}{M},$$

звідки

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (11)$$

Рівняння стану в формі (11) називають *рівнянням Клапейрона*, і воно є однією з форм запису рівняння стану.

### Закон Дальтона

Скажімо, маємо суміш ідеальних газів, розміщених в об'ємі  $V$  при температурі  $T$ . Тиск, який би чинив кожний газ на стінку посудини окремо, називають *парціальним*. Молярну масу і масу газів, які заповнюють посудину, позначимо відповідно  $M_1, m_1, M_2, m_2, \dots, M_n, m_n$ . Для кожного газу можна записати рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$p_1 = \frac{m_1}{M_1} \frac{RT}{V}, \quad p_2 = \frac{m_2}{M_2} \frac{RT}{V}, \quad \dots, \quad p_n = \frac{m_n}{M_n} \frac{RT}{V}.$$

Додамо почленно ці рівності і визначимо повний тиск:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n} \right) \frac{RT}{V}.$$

Ця рівність є виразом *закону Дальтона*:

повний тиск газу дорівнює сумі парціальних тисків усіх газів, що входять до суміші.

Закон Дальтона застосовується до дуже розріджених газів.

### Газові закони

За допомогою рівняння стану ідеального газу можна простежити процеси, в яких маса газу і один

з трьох параметрів – температура, тиск або об'єм – залишаються незмінними, а два інші змінюються.

Це так звані *ізопроеци*:

– *ізоермічний* – процес, у якому при сталій температурі змінюються тиск і об'єм;

– *ізобарний* – процес, у якому при сталому тиску змінюються температура і об'єм;

– *ізохорний* – процес, у якому при сталому об'ємі змінюються температура і тиск.

*Ізоермічний процес* ( $T = \text{const}$ ). Для ізоермічного процесу експериментально визначений *закон Бойля-Маріотта*:

для даної маси газу при сталій температурі добуток об'єму газу на відповідний йому тиск є величина стала, тобто

$$pV = \text{const} \quad \text{при } T = \text{const}, m = \text{const}.$$

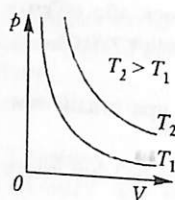
Для двох довільних станів газу при  $T_1 = T_2$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

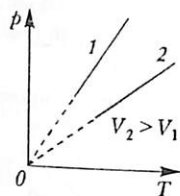
Відповідно до закону Бойля-Маріотта *для даної маси газу при сталій температурі тиск газу обернено пропорційний його об'єму*.

Закон Бойля-Маріотта легко отримати з рівняння стану (10), поклавши  $T = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ , або з рівняння (11), поклавши  $T_1 = T_2$ .

Графічно закон Бойля-Маріотта на  $p$ - $V$ -діаграмі (мал. 88) зображений гіперболою, яка називається *ізоермою*. Чим більша температура, при



Мал. 88



Мал. 89



Мал. 90

якій відбувається ізотермічний процес, тим далі розташована ізотерма від початку координат.

**Ізохорний процес** ( $V = \text{const}$ ). Для ізохорного процесу експериментально встановлено **закон Шарля**:

для даної маси газу відношення тиску до абсолютної температури постійне, якщо об'єм не змінюється, тобто

$$\frac{p}{T} = \text{const} \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const}.$$

Для двох довільних станів газу при  $V_1 = V_2$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Відповідно до закону Шарля для даної маси газу при сталому об'ємі тиск газу прямо пропорційний його абсолютній температурі,  $p = \text{const} \cdot T$ .

Закон Шарля легко отримати з рівняння стану (10), поклавши  $m = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$ , або з рівняння (11), поклавши  $V_1 = V_2$ .

Графічно закон Шарля на  $p$ - $T$ -діаграмі зображується прямою, яка називається **ізохорою** (мал. 89). Різним об'ємам відповідають різні ізохори. Чим більший об'єм, при якому відбувається ізохорний процес, тим менший кут нахилу ізохори до осі температур.

**Ізобарний процес** ( $p = \text{const}$ ). Для ізобарного процесу експериментально встановлений **закон Гей-Люссака**:

для даної маси газу відношення об'єму до температури постійне, якщо тиск не змінюється, тобто

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ при } p = \text{const}, m = \text{const}.$$

Для двох станів газу при  $p_1 = p_2$  справедлива рівність

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Відповідно до закону Гей-Люссака для даної маси газу при сталому тиску об'єм газу прямо пропорційний його абсолютній температурі,  $V = \text{const} \cdot T$ .

Закон Гей-Люссака легко отримати з рівняння стану (10), поклавши в ньому  $m = \text{const}$ ,  $p = \text{const}$ , або з рівняння (11), поклавши  $p_1 = p_2$ .

Графічно закон Гей-Люссака на  $V$ - $T$ -діаграмі зображується прямою, яка називається **ізобарою** (мал. 90). Різним тискам відповідають різні ізо-

бари. Ізобара, що стосується вищого тиску  $p_2$ , лежить нижче, ніж ізобара, що відповідає нижчому тиску  $p_1$ .

У сфері низьких температур всі ізобари ідеального газу сходяться в точці  $T=0$ ,  $V=0$ . Але це не означає, що об'єм реального газу дорівнює нулю. Всі гази при сильному охолодженні перетворюються в рідини, а для рідин рівняння стану (10) неприйнятне.

**Закон Авогадро.** Одним із основних законів ідеального газу є закон, відкритий у 1811 р. італійським ученим А. Авогадро:

при однакових тисках і температурах в однакових об'ємах різних газів міститься однакове число молекул.

Згідно із законом Авогадро при однакових тисках і температурах молі різних ідеальних газів займають однакові об'єми.

1 моль будь-якого ідеального газу за нормальних умов ( $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па = 760 мм рт. ст. і  $t = 0^\circ\text{C}$ ) займає об'єм 22,4 літра ( $22,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>).

Число молекул, що міститься в 1 см<sup>3</sup> ідеального газу за нормальних умов, називається *сталого Лошмідта* і дорівнює  $2,687 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

### Розділ 3. Основи термодинаміки

#### Внутрішня енергія. Кількість теплоти. Теплоємність

*Внутрішня енергія* – енергія, що залежить від внутрішньої будови тіл і є мірою руху та взаємодії всіх частинок, з яких складається тіло. Внутрішня енергія змінюється під час зміни стану тіла – нагріванні, деформації, переході з одного агрегатного стану в інший.

Внутрішню енергію одного моля  $U_M$  одного ідеального газу можна знайти через середню кінетичну енергію  $\bar{w}$  однієї молекули і число Авогадро  $N_A$ :

$$U_M = N_A \bar{w} = N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} RT.$$

Тоді внутрішня енергія  $U$  довільної маси  $m$  одноатомного ідеального газу з молярною масою  $M$

$$U = \frac{m}{M} U_M = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (12)$$

*Кількістю теплоти*  $Q$  називають міру внутрішньої енергії  $\Delta U$ , переданої в процесі теплообміну від одного тіла до іншого без виконання роботи:

$$Q = \Delta U.$$

Кількість теплоти, що йде на нагрівання тіла масою  $m$  на  $\Delta t^\circ\text{C}$  або на  $\Delta T$  кельвінів, визначають

за формулою

$$Q = cm \Delta t, \text{ або } Q = c m \Delta T,$$

де  $\Delta t = t_2 - t_1 = \Delta T = T_2 - T_1$ . Сталий для даної речовини коефіцієнт  $c$  називають *питомою теплоємністю речовини*; значення його знаходять з таблиць. Питома теплоємність речовини  $c$  чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати 1 кг цієї речовини для нагрівання на 1 °C або на 1 K.

Чисельні значення питомих теплоємностей різних речовин значно відрізняються одне від одного. Наприклад, для води  $c = 4190$  Дж/(кг·K), для льоду  $c = 2100$  Дж/(кг·K), а для свинцю  $c = 130$  Дж/(кг·K).

Часто користуються іншою величиною – *теплоємністю С тіла*, тобто кількістю теплоти, яку слід надати даному тілу для нагрівання на 1 °C чи на 1 K. Питома теплоємність речовини  $c$  та теплоємність тіла  $C$  пов'язані співвідношенням  $C = cm$ . Кількість теплоти, що йде на нагрівання тіла теплоємності  $C$  визначають за формулою

$$Q = C \Delta t, \text{ або } Q = C \Delta T.$$

Кількість теплоти визначають спеціальним приладом – *калориметром*, будова якого забезпечує теплообмін між тілами за умов теплоізоляції від впливу навколишнього середовища.

*Рівняння теплового балансу*. Розглянемо теплоізовану систему (калориметр), в якій відбувається

теплообмін між кількома більш і менш нагрітими тілами. За *законом збереження енергії*

під час теплообміну між тілами в теплоізованій системі загальна (сумарна) кількість теплоти, відданої всіма тілами, які охолоджуються, дорівнює сумарній кількості теплоти, отриманої усіма тілами, що нагріваються.

Позначимо кількості теплот, що в і д а ю т ь більш нагріті тіла під час охолодження, через  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , де  $n$  – загальна кількість цих тіл. Через  $Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_m$  позначимо кількості теплот, о т р и м а н і тілами, що нагріваються ( $m$  – кількість менш нагрітих тіл, які поглинають теплоту). Тоді за законом збереження енергії

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q'_1 + Q'_2 + \dots + Q'_m.$$

Це рівняння називають *рівнянням теплового балансу*.

*Теплота згоряння*. Під час згоряння будь-якого палива його внутрішня енергія зменшується і у вигляді відповідної кількості теплоти передається навколишнім тілам. Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні палива масою  $m$ , визначають за формулою

$$Q = q m,$$

де  $q$  – *питома теплота згоряння палива*, тобто кількість теплоти, яка виділяється під час повного згоряння 1 кг даного палива. Значення  $q$  знаходять з таблиць.

## Перший закон термодинаміки

*Перший закон термодинаміки* – це закон збереження й перетворення енергії під час теплових процесів. Його формують так:

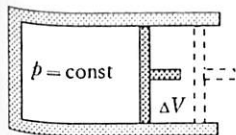
кількість теплоти  $Q$ , яку отримує термодинамічна система, йде на зміну (підвищення) її внутрішньої енергії  $\Delta U$  і на виконання цієї системою роботи  $A$  над зовнішніми тілами:

$$Q = \Delta U + A.$$

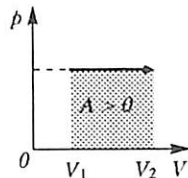
*Робота в термодинаміці.* Під час ізобарного розширення газ здійснює роботу проти сил, що створюють зовнішній тиск на нього. Наприклад, розширюючись, газ пересуває поршень, зображений на мал. 91. Роботу  $A$ , що виконує ідеальний газ під час ізобарного розширення, визначають за формулою

$$A = p \Delta V \quad (\text{при } p = \text{const}),$$

де  $\Delta V$  – зміна об'єму газу:  $\Delta V = V_2 - V_1$  (мал. 92). Якщо газ розширюється,  $\Delta V > 0$ , отже, робота при розширенні додатна:  $A > 0$ . Якщо газ стискається,  $\Delta V < 0$  і  $A < 0$ . Графічно процес ізобарного розширення на  $p$ - $V$ -діаграмі зображується відрізком прямої, паралельної до осі абсцис (мал. 92). Робота розширення газу чисельно дорівнює площі під цим графіком.



Мал. 91



Мал. 92

## Застосування першого закону термодинаміки для вивчення ізопроцесів в ідеальному газі

*Ізобарний процес.* В процесі *ізобарного розширення* за рахунок наданої теплоти газ нагрівається й одночасно розширюється, залишаючись при сталому тиску. Під час зворотного процесу, тобто тоді, коли відбувається *ізобарне стиснення*, газ охолоджується, віддаючи тепло навколишньому середовищу.

Перший закон термодинаміки для ізобарного процесу в ідеальному газі формують так:

під час ізобарного процесу кількість теплоти, яка надана газу, йде на його нагрівання (тобто на підвищення внутрішньої енергії) і на роботу розширення, що газ здійснює проти сил зовнішнього тиску:

$$Q = \Delta U + A \quad \text{або} \quad Q = \Delta U + p \Delta V.$$

Якщо в ізобарному процесі одноатомний газ при сталому тиску  $p$  нагрівається від температури  $T_1$

до  $T_2$  і розширюється при цьому від об'єму  $V_1$  до  $V_2$ , то зміна температури  $\Delta T = T_2 - T_1$  пов'язана зі зміною об'єму  $\Delta V = V_2 - V_1$  рівнянням:

$$p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Тому зміна внутрішньої енергії в ізобарному процесі відповідно до (12) дорівнює

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{3}{2} p\Delta V.$$

Тоді  $Q = \Delta U + A = (3/2) p\Delta V + A = (3/2)A + A = (5/2)A$ , звідки  $A = (2/5)Q$ ,  $\Delta U = (3/5)Q$ .

Очевидно, що під час ізобарного розширення одноатомного ідеального газу  $3/5$  (60%) наданої теплоти йде на збільшення внутрішньої енергії газу, а  $2/5$  (40%) – на здійснення роботи.

**Ізотермічний процес.** Під час ізотермічного процесу (розширення або стиснення газу) температура не змінюється, тому не змінюється й внутрішня енергія газу:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 0 \Rightarrow U = U_2 - U_1 = 0.$$

Тому перший закон термодинаміки для ізотермічного процесу в ідеальному газі формулюють так:

під час ізотермічного процесу вся надана газу теплота йде на виконання роботи під час розширення газу:

$$Q = A, \text{ або } Q = p\Delta V \quad (\text{при } T = \text{const}).$$

**Ізохорний процес.** Під час ізохорного процесу (нагрівання або охолодження) об'єм газу не змінюється, тому й не виконується робота:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 0 \Rightarrow A = p\Delta V = 0.$$

Тож перший закон термодинаміки для ізохорного процесу в ідеальному газі має таке визначення:

під час ізохорного процесу вся надана газу теплота йде на збільшення його внутрішньої енергії:

$$Q = \Delta U \quad (\text{при } V = \text{const}).$$

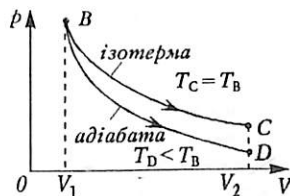
**Адіабатичний процес.** Адіабатичним (адіабатним) називають процес, при якому система не дістає ззовні і не віддає теплоти ( $Q = 0$ ). Перший закон термодинаміки для адіабатного процесу в ідеальному газі формулюють так:

в адіабатному процесі газ виконує роботу за рахунок зменшення своєї внутрішньої енергії:

$$A = -\Delta U, \text{ або } p\Delta V = -\Delta U.$$

Згідно з цією формулою під час адіабатного розширення газ охолоджується, а під час адіабатного стиснення – нагрівається. Наприклад, під час розширення  $\Delta V > 0$ , тому  $\Delta U = -p\Delta V < 0$ . Отже,  $\Delta T < 0$ .

На мал. 93 наведені графіки двох процесів:



Мал. 93



ізотермічного ( $BC$ ) і адіабатичного ( $BD$ ). Щоразу газ розширюється від об'єму  $V_1$  до  $V_2$ , але в процесі  $BC$  температура газу не змінюється, а в процесі  $BD$  – спадає, тому ділянка адіабати розташована нижче, ніж ділянка ізотерми.

Адіабатичний процес можна здійснити в системі, оточеній теплоізоляційною оболонкою. Але якщо система й не має теплоізоляції, адіабатичним можна вважати процес, який відбувається настільки швидко, що система не встигає вступити в теплообмін з навколишнім середовищем.

### Другий закон термодинаміки

*Необоротні процеси* – це процеси, які можуть довільно відбуватися лише в одному певному напрямі. Всі макроскопічні процеси в природі – необоротні, вони протікають тільки в одному напрямі. Наведемо приклади таких процесів.

1. Коливання маятника, виведеного з положення рівноваги, затухають. Зворотний процес (тобто самочинне зростання коливань) не може виникнути.

2. Нагріті тіла завжди охолоджуються, передаючи свою енергію холоднішим тілам. Зворотний процес передачі теплоти від холодного тіла до теплішого самочинно ніколи не відбувається.

*Другий закон термодинаміки* виражає необоротність процесів у природі та вказує напрям можливих енергетичних процесів. Наведемо його у формулюванні Клаузіуса:

теплота самочинно завжди передається від більш нагрітих тіл до менш нагрітих. Зворотний процес неможливий, тобто неможливо передати енергію у формі теплоти від холодних тіл до нагрітих без одночасних змін в навколишньому середовищі.

### ККД теплового двигуна. Цикл Карно

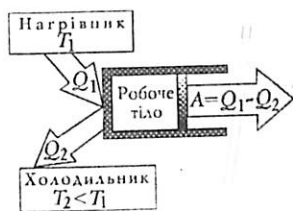
*Тепловим двигуном* називають пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну. Принцип його роботи пояснює схема, наведена на мал. 94.

Існують три необхідні умови для роботи теплового двигуна:

а) наявність *робочого тіла* (пари, газу), яке, нагріваючись при згорянні палива і розширюючись, здатне виконати механічну роботу;

б) використання в роботі теплового двигуна *колового процесу (циклу)*, тобто замкненого термодинамічного процесу, в результаті якого система повертається до початкового стану;

в) наявність нагрівателя і холодильника. (*Нагрівателем* називають тіло або середовище з температурою вищою, ніж її має робоче тіло, *холодильником* – тіло або середовище з температурою нижчою, ніж



Мал. 94

у робочого тіла). Розширення газу в тепловому двигуні має відбуватися при температурі нагрівника, а стискування – при температурі холодильника.

Одне із формулювань другого закону термодинаміки стверджує, що неможливий такий періодичний процес, єдиним результатом якого було б перетворення теплоти в роботу (*формулювання Планка*). Тому в тепловому двигуні лише певна частина теплоти  $Q_1$ , одержаної робочим тілом від нагрівника, перетворюється в роботу  $A$ , а інша ( $Q_2$ ) не використовується і передається холодильнику (мал. 94).

Ефективність роботи теплового двигуна характеризується його *коефіцієнтом корисної дії* (ККД), який дорівнює відношенню кількості теплоти, перетвореної двигуном у механічну роботу ( $A = Q_1 - Q_2$ ), до кількості теплоти  $Q_1$  ( $Q_1 > 0$ ), отриманої від нагрівника:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

де  $Q_2$  – кількість теплоти, яку робоче тіло віддає холодильнику ( $Q_2 > 0$ ). Згідно з другим законом термодинаміки ККД будь-якого теплового двигуна завжди менший одиниці.

**Цикл Карно.** В тепловому двигуні, для одержання під час циклу корисної роботи, розширення газу слід вести при підвищених тиску і температурі, а стискування – при тиску і температурі,

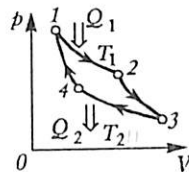
нижчих від тих, при яких газ розширювався. Якщо температура нагрівника в тепловому двигуні має певне значення  $T_1$ , а холодильника –  $T_2$ , в ньому можна провести безліч колових процесів, у яких буде одержана корисна робота. Але найвигіднішим, як довів французький фізик С. Карно, буде оборотний цикл, що складається з двох ізо-термічних і двох адіабатичних процесів. Такий цикл називають *циклом Карно* (мал. 95).

Цикл Карно – це ідеальний цикл двигуна, в якому усунути будь-які втрати, крім передачі енергії холодильнику. В процесі ізо-термічного розширення при температурі  $T_1$  робочому тілу (ідеальному газу) надається певна кількість теплоти  $Q_1$  від нагрівника, а при ізо-термічному стисканні при температурі  $T_2 < T_1$  від газу забирається певна кількість теплоти  $Q_2$  і передається холодильнику.

ККД циклу Карно не залежить від конструкції теплового двигуна та природи робочого тіла і має максимально можливе теоретичне значення, яке дорівнює

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (13)$$

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  будь-якої реальної теплової машини, що працює при максимальній температурі  $T_1$  і мінімальній  $T_2$ , не може перевищувати ККД  $\eta_M$  циклу Карно:  $\eta \leq \eta_M$ .



Мал. 95

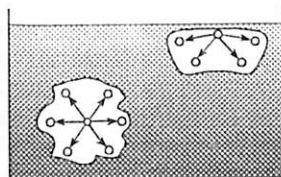
З (13) виходить, що значення ККД можна підвищити, якщо збільшувати різницю  $T_1 - T_2$  між температурами нагрівника та холодильника. Холодильниками для теплових двигунів, як правило, є атмосферне повітря або вода при температурі  $T_2$  близько 300 К, і немає сенсу брати температуру  $T_2$  нижчою температури навколишнього середовища. Основний шлях підвищення ККД теплових двигунів – це підвищення температури  $T_1$  нагрівника. Але її не можна підняти вище температури плавлення тих матеріалів, з яких виготовляється тепловий двигун. Наприклад, температура нагрівника сучасної парової турбіни наближається до 850 К і максимально можливе значення ККД, обчислене за (13), становить близько 65%.

#### Розділ 4. Властивості рідин

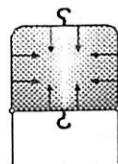
##### Поверхневий натяг. Капілярні явища

У рідкому стані молекули розташовані впритул одна до одної. Тому об'єм рідин мало залежить від тиску – рідини практично не мають тиску, як і тверді тіла. Але, на відміну від твердих тіл, рідинам властива *текучість*, тобто вони не зберігають свою форму, а приймають форму посудини, в якій містяться. Текучість рідин зумовлена переміщенням молекул.

**Поверхневий натяг.** На молекулу, що міститься на поверхні рідини, діють сили притягання з боку внутрішніх молекул (мал. 96). Під дією цих сил частина молекул виходить з поверхні всередину



Мал. 96



Мал. 97

рідини. Поверхневий шар при цьому скорочується і перебуває в стані своєрідного натягу. Тому молекули поверхневого шару мають підвищену енергію.

Силами *поверхневого натягу* називають сили, що скорочують поверхневу плівку рідини і діють перпендикулярно до лінії контуру, котра обмежує поверхню рідини (мал. 97):

$$F = \alpha l,$$

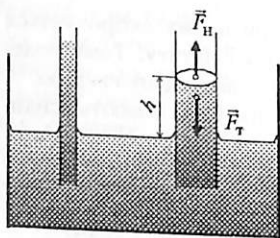
де  $l$  – довжина межі плівки;  $\alpha$  – *коефіцієнт поверхневого натягу*, який дорівнює силі поверхневого натягу, що діє на одиницю довжини межі плівки. Значення  $\alpha$  знаходять з таблиць.

Якщо під дією поверхневого натягу зменшується площа поверхневого шару рідини, енергія цього шару теж зменшується. При цьому сили поверхневого натягу здійснюють роботу  $A$ , рівну за модулем і протилежну за знаком зміні енергії поверхневого шару  $\Delta W$ :

$$A = -\Delta W = -\alpha \Delta S,$$

де  $\Delta S$  – зміна площі поверхневого шару рідини,  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

**Змочування і капілярні явища.** Якщо притягання між молекулами рідини слабкіше від зчеплення між молекулами рідини і твердим тілом, то рідина змочує поверхню твердого тіла. Якщо ж взаємне притягання молекул рідини між собою більше, ніж притягання їх до молекул твердого тіла, рідина не змочує твердого тіла.



Мал. 98

При змочуванні рідина піднімається в капілярах (трубках дуже малого діаметра), які занурені в посудину, а при незмочуванні — опускається. Висоту піднімання рідини в капілярі (мал. 98) визначають за формулою:

$$h = \frac{2\alpha}{\rho r}$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт поверхневого натягу,  $\rho$  — густина рідини,  $r$  — радіус капіляра.

### Пароутворення і конденсація

**Теплота пароутворення і теплота конденсації.** Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають *пароутворенням*, а зворотний процес, тобто перехід з газоподібного стану в рідину, — *конденсацією*. Перехід речовини з одного агрегатного стану в інший називають *фазовим переходом*. Отже, пароутворення і конденсація — фазові переходи. Вони відбуваються

при сталому тискові і сталій температурі, коли рідина перебуває в рівновазі зі своєю парою. Такі процеси в термодинаміці називають *ізобарно-ізоермічними рівноважними процесами*.

Для перетворення рідини в пару речовині потрібно надати певну кількість теплоти, яку називають *теплотою пароутворення*. Теплота є мірою передачі внутрішньої енергії. Тому надана тілу теплота пароутворення йде на збільшення внутрішньої енергії речовини. Це означає, що внутрішня енергія певної маси пари більша, ніж внутрішня енергія такої ж маси рідини при тій самій температурі. Тому під час конденсації пари виділяється кількість теплоти (*теплота конденсації*), рівна за модулем теплоті пароутворення.

Теплота пароутворення (або конденсації)  $Q$  прямо пропорційна масі тіла  $m$  і деякій залежній від роду речовини сталій  $r$ , що називається *питомою теплотою пароутворення*:

$$Q = rm.$$

*Питома теплота пароутворення речовини*  $r$  — це величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку треба надати речовині одиничної маси в рівноважному процесі при температурі насиченої пари, щоб перетворити її з рідкого стану в газоподібний.

Чисельне значення питомих теплот пароутворення різних речовин різні, причому залежать від тиску і температури (при збільшенні тиску  $r$  зростає): Для води при  $100^\circ\text{C}$  і нормальному атмо-

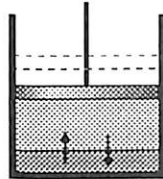
сферному тиску  $r = 2260$  кДж/кг. Питома теплота пароутворення речовини залежить насамперед від сил взаємного притягання її молекул.

**Випаровування.** Пароутворення відбувається двома способами – випаровуванням і кипінням. **Випаровування** – це пароутворення лише з поверхні рідини. Під час випаровування рідину покидають найшвидші молекули. Внаслідок цього рідина під час випаровування охолоджується.

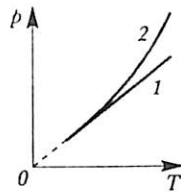
**Насичена пара.** У відкритій посудині випаровування рідини йде доти, доки вся вона не перетвориться в пару. Якщо ж рідина міститься в закритій посудині, рано чи пізно настає *динамічна рівновага* – стан, при якому число молекул, що покидають рідину, дорівнює в середньому числу молекул пари, які повернулися за той самий час в рідину (мал. 99). Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають *насиченою*.

Концентрація молекул насиченої пари і її тиск не залежать від об'єму рідини. Якщо, наприклад, стиснути насичену пару, що міститься в герметичній посудині в рівновазі з рідиною (мал. 99), рівновага між процесами випаровування і конденсації порушиться. Частина пари буде перетворюватися в рідину до тих пір, поки в зменшеному об'ємі посудини знов не встановиться динамічна рівновага при тих самих значеннях тиску пари й концентрації молекул.

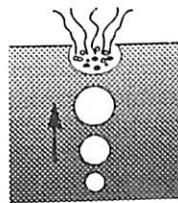
Тиск насиченої пари з підвищенням температури зростає швидше, ніж тиск ідеального газу (мал. 100). Це пояснюється зростанням концентрації



Мал. 99



Мал. 100



Мал. 101

молекул насиченої пари в герметичній посудині під час її нагрівання.

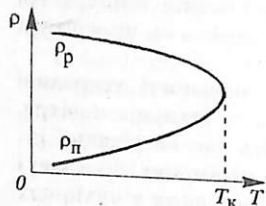
**Кипіння.** Пароутворення, що відбувається одночасно як з поверхні, так і з усього об'єму рідини, називають *кипінням*. На відміну від випаровування, яке відбувається за будь-якої температури, кипіння починається лише при певній температурі (*температурі кипіння*), до якої має прогрітисся рідина в усьому об'ємі.

Кипіння можливе лише за наявності усередині рідини центрів пароутворення – пухирців повітря, що містять насичену пару. Під час нагрівання рідини тиск насиченої пари в пухирцях зростає і об'єм їх збільшується. Коли тиск пари в пухирцях зрівнюється із зовнішнім тиском на поверхню рідини, вони відриваються від стінок посудини, піднімаються вгору і викидають у повітря пару (мал. 101). Починається кипіння, тобто випаровування всередині рідини з виділенням пухирців пари.

Температура кипіння залежить від природи рідини і зовнішнього тиску на неї. З підвищенням

зовнішнього тиску температура кипіння підвищується, а зі зниженням тиску – спадає. При зменшенні атмосферного тиску в 2,5 рази, тобто приблизно до  $4 \cdot 10^4$  Па (300 мм рт.ст.), температура кипіння води становить тільки  $70^\circ\text{C}$ . Такий тиск існує в горах на висоті приблизно 7100 метрів над рівнем моря, і зварити м'ясо в цих умовах неможливо. Якщо ж тиск над нагрітою водою у 1,6 раза більший за нормальний атмосферний тиск, вона закипає тільки при  $200^\circ\text{C}$ .

**Критична температура.** При підвищенні температури густина рідини, що перебуває в рівновазі зі своєю паром, зменшується, а густина пари зростає (мал. 102). При деякій температурі, яку називають *критичною*, густина рідини стає рівною густині пари.



Мал. 102

При критичній температурі зникає відмінність фізичних властивостей рідини і насиченої пари. При температурах, більших за критичну, речовина існує тільки в газоподібному стані і її не можна перетворити в рідину ні за яких тисків.

### Вологість повітря

Під *вологістю* повітря розуміють наявність водяної пари у повітрі. Тиск водяної пари є парціальним, тобто однією із складових повного ат-

мосферного тиску. Найбільше значення цього парціального тиску при даній температурі має насичена водяна пара.

**Абсолютною вологістю** називають величину  $\rho$ , яка дорівнює масі водяної пари, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря при даній температурі (інакше кажучи, абсолютна вологість дорівнює густині водяної пари). Її прийнято вимірювати в грамах на кубічний метр,  $\text{г/м}^3$ .

**Відотною вологістю** називають величину  $\phi$ , яка дорівнює відношенню густини  $\rho$  водяної пари при даній температурі до густини  $\rho_n$  насиченої пари при тій самій температурі:

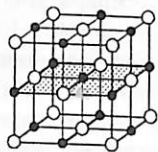
$$\phi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\% .$$

**Точка роси**  $T_p$  – це температура, при якій водяна пара стає насиченою внаслідок ізохорного охолодження. Якщо водяну пару охолоджують нижче від точки роси, вона частково перетворюється у воду внаслідок *скаплення*.

## Розділ 5. Властивості твердих тіл

### Кристалічні й аморфні тіла. Анізотропія

Твердими називають тіла, які зберігають не тільки свій об'єм (як рідини), а й форму. **Кристалічні** тверді тіла (*кристали*) – це тверді тіла, атоми або молекули яких займають впорядковані положення у просторі.



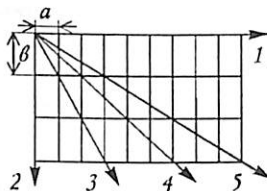
Мал. 103

Властиве даному кристалу впорядковане розміщення частинок (атомів, молекул, іонів), яке характеризується періодичним повторенням у просторі, називають *просторовою кристалічною решіткою*. Її можна уявити собі як просторову сітку, вузли якої збігаються з центрами коливань частинок у кристалі (мал. 103).

Фізичні властивості кристалу неоднакові у різних напрямках, але збігаються в паралельних напрямках. Залежність фізичних властивостей від напрямку всередині кристала називають *анізотропією* (від грецьк. "анісос" – неоднаковий, "тросос" – напрям).

Анізотропія – характерна ознака всіх кристалів. Вона пояснюється неоднаковими відстанями між атомами вздовж різних напрямів (мал. 103, 104).

В *аморфних* тілах розташування атомів чи молекул не впорядковане, і вони *ізотропні*, тобто їх фізичні властивості в усіх напрямках однакові. До аморфних тіл відносяться скло, ебоніт, смола, пластмаси та ін. На відміну від кристалічних тіл аморфні не мають просторової решітки і для них



Мал. 104

не існує певної температури плавлення, властивої кристалічним тілам.

Кристалічним тілам властивий *дальній порядок*, тобто таке впорядковане розташування у просторі молекул, атомів або іонів, яке повторюється у всьому об'ємі тіла на відстані тисяч та десятків тисяч періодів кристалічної решітки (мал. 103).

Якщо періодичне розташування атомів або іонів існує на невеликих відстанях (кілька ребер решітки), кажуть про *ближній порядок*. Він властивий аморфним і кристалічним твердим тілам та рідинам.

Кристалічні тіла поділяються на *монокристали* і *полікристали*. Головна ознака монокристала – періодична структура в усьому його об'ємі. Монокристали більшості металів мають дуже малі розміри ( $10^{-6}$  –  $10^{-7}$  м) і називаються *зернами*. Сукупність таких хаотично розташованих кристалів (зерен) складає *полікристал*. Отже, полікристалічне тіло містить велику кількість маленьких кристалів, які зрослися один з одним. Кожний такий монокристалік анізотропний, але все полікристалічне тіло ізотропне.

### Плавлення, кристалізація і сублімація

Процес переходу речовини з твердого стану в рідкий називають *плавленням*, а обернений процес, тобто перехід рідини в твердий стан, – *кристалізацією* (ствердінням). Плавлення кристалічного тіла і кристалізація рідини – це ізобарно-

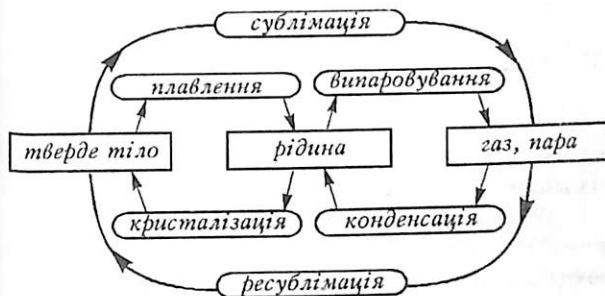
ізотермічні рівноважні процеси, тобто такі, що відбуваються при певному сталому тиску і сталій температурі. Температуру, при якій тіла плавляться або кристалізуються, називають *температурою плавлення*.

Для розплавлення кристалічного тіла йому потрібно надати певну кількість теплоти, яку називають *теплотою плавлення*. Теплота є мірою передачі внутрішньої енергії, тому надана тілу теплота плавлення йде на збільшення внутрішньої енергії речовини. Це означає, що внутрішня енергія певної маси рідини більша за внутрішню енергію такої ж маси кристалічної речовини при тій самій температурі. Тому під час кристалізації виділяється кількість теплоти (т.зв. *теплота кристалізації*), яка за модулем дорівнює теплоті плавлення.

Теплота плавлення (або кристалізації)  $Q$  прямо пропорційна масі тіла  $m$  і деякій залежній від роду речовини сталій  $\lambda$ , що називається питомою теплотою плавлення:

$$Q = \lambda m.$$

*Питома теплота плавлення речовини  $\lambda$*  – це величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, потрібної для повного перетворення кристалічної речовини масою 1 кг з твердого стану у рідкий при температурі плавлення. Значення  $\lambda$  знаходять з таблиць. Чисельні значення питомих теплот плавлення різних речовин неоднакові. Наприклад, для льоду  $\lambda = 334$  кДж/кг, а для свинцю  $\lambda = 24$  кДж/кг.



Мал. 105

Процес переходу речовини з твердого стану безпосередньо в газоподібний, минаючи рідку фазу, називають *сублімацією*. Сублімація є одним із різновидів випаровування; вона можлива за будь-якої температури й тиску, при яких співіснують твердий і газоподібний стани речовини. Питома теплота сублімації дорівнює сумі питомих теплот плавлення і пароутворення ( $L = \lambda + r$ ). Сублімації піддаються, наприклад, нафталін, кристали льоду, йоду.

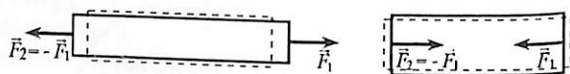
Процес, обернений сублімації, тобто перехід газу одразу в твердий стан, зветься *кристалізацією з газоподібної фази*, або *ресублімацією*.

На діаграмі (мал. 105) показано напрями можливих змін стану речовини.

### Деформація твердих тіл

*Деформацією* твердого тіла називається зміна його форми або об'єму. Деформація відбувається



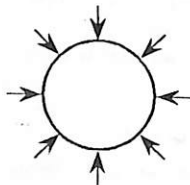


Мал. 106

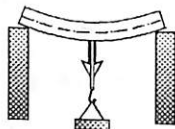
під час нагрівання (охолодження) твердих тіл або під впливом зовнішніх сил.

У деформованому тілі виникають сили пружності. Під час пружних деформацій після припинення дії зовнішньої сили частинки деформованого тіла повертаються до своїх вихідних положень і тіло повністю відтворює першопочаткові розміри й форму. *Непружні* або *пластичні* деформації твердого тіла не зникають після того, як зовнішня сила припиняє свою дію, і в тілі зберігаються так звані *залишкові* деформації.

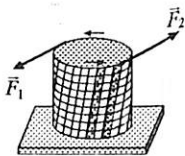
Залежно від характеру зміщення частинок під час деформації розрізняють деформації *однобічного розтягу* (стиску) (мал. 106), *всесбічного розтягу* (стиску) (мал. 107), *згину* (мал. 108), *кручення* (мал. 109) і *зсуву* (мал. 110).



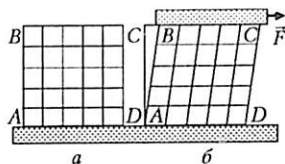
Мал. 107



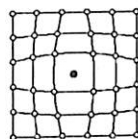
Мал. 108



Мал. 109



Мал. 110



Мал. 111



Мал. 112

## Дефекти кристалічних решіток

Експериментальні вимірювання міцності твердих тіл показали, що її значення набагато менші за ті, які розраховані теоретично. Виявилось, що причиною таких низьких значень міцності полягає в тому, що в будь-якому реальному кристалі є порушення кристалічної будови – *дефекти*. Дефекти можуть бути точковими, лінійними і об'ємними.

*Точковим* дефектом називають вільний від атома вузол (т. зв. *вакансія*) або вузол, зайнятий атомом чужого сорту. Чужорідний атом може також розташуватися в проміжках між атомами, що утворюють кристалічну решітку (мал. 111).

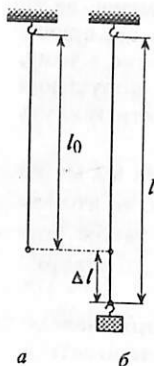
Приклад лінійного дефекту (*дислокації*) наведено на мал. 112. Така дислокація спостерігається, коли один шар всередині кристала не є закінченим, тобто в якомусь місці кристалічної решітки є зайва напівплощина.

В області точкових дефектів або дислокацій відстані між сусідніми атомами більші, ніж в ідеальному кристалі, тож сили притягання між атомами деформованого кристалу зменшуються. Тому де-

фекти кристалічної будови полегшують руйнування твердих тіл.

### Механічні властивості твердих тіл

Розглянемо деякі механічні властивості твердого тіла на прикладі дослідження деформації розтягу. На мал. 113а зображено нерозтягнений металевий дріт довжиною  $l_0$  і поперечним перерізом  $S$ , на мал. 113б – той самий дріт, видовжений до довжини  $l$  під дією вантажу. Різницю довжин видовженого і невидовженого дроту називають *абсолютним видовженням*  $\Delta l$ :



Мал. 113

Стан деформованого тіла характеризують *механічною напругою*, або просто *напругою* – скалярною величиною  $\sigma$ , що дорівнює відношенню модуля сили пружності  $F$  до площі  $S$  поперечного перерізу тіла:

$$\Delta l = l - l_0. \quad (14)$$

*Відносне видовження* – величина  $\epsilon$ , що дорівнює відношенню абсолютного видовження до початкової довжини дроту:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (15)$$

Додатні значення  $\epsilon$  і  $\Delta l$  відповідають *деформації розтягу*:

$$\epsilon > 0 \Rightarrow \Delta l > 0 \Rightarrow l > l_0.$$

Від'ємні значення  $\epsilon$  і  $\Delta l$  відповідають *деформації стиску*:

$$\epsilon < 0 \Rightarrow \Delta l < 0 \Rightarrow l < l_0.$$

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

Одиниця механічної напруги в СІ зветься, як і одиниця тиску, – *паскаль* (1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>).

Для однобічного розтягу (стиску) експериментально встановлений *закон Гука*:

під час малих деформацій напруга  $\sigma$  прямо пропорційна відносному видовженню  $\epsilon$ :

$$\sigma = E |\epsilon|, \quad (16)$$

де  $E$  – коефіцієнт, що називають *модулем пружності*, або *модулем Юнга*. Значення  $E$  залежить від пружних властивостей матеріалу, з якого виготовлене тіло і знаходиться з таблиць. Як і напруга, модуль пружності вимірюється у *паскалях*.

Закону Гука, записаному у формі (16), легко надати вигляду відомого з першого розділу книжки (формула 17). Якщо підставити у формулу (16) значення  $\sigma = F/S$  і  $\epsilon = \Delta l/l_0$ , дістанемо

$$F = \frac{SE}{l_0} |\Delta l|,$$

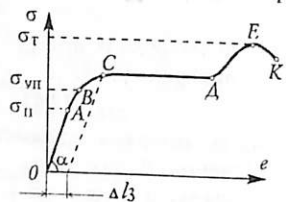
Позначимо  $SE/l_0 = k = \text{const}$ . І, отже, маємо закон Гука:

$$F = k |\Delta l|, \quad (17)$$

де  $k$  – жорсткість стержня. Коефіцієнти пропорційності  $k$  і  $E$ , що входять до формул (16) і (17), різні за фізичним змістом. Жорсткість характеризує даний стержень (дріт); а модуль Юнга – речовину, з якої він зроблений. Модуль Юнга чисельно дорівнює напрузі, під дією якої зразок, виготовлений з даного матеріалу, видовжується удвічі.

## Діаграма розтягу

Діаграма розтягу – це графік експериментально перевіреної залежності механічної напруги зразка  $\sigma$  від його відносного видовження  $\epsilon$  (мал. 114). Розглянемо хід цього графіка.



Мал. 114

При малих деформаціях, тобто малих значеннях відносного видовження, згідно з законом Гука, механічна напруга в розтягнутому зразку лінійно зростає із збільшенням деформації. Максимальне значення напруги, при якій ще справджується закон Гука, називають *границею пропорційності* і позначають  $\sigma_{п}$ . Максимальна напруга, за якої ще не виникають помітні залишкові деформації, – це *границя пружності*  $\sigma_{пр}$ .

При навантаженнях (напругах), більших за границю пружності, починається відхилення від закону Гука, і коли навантаження знімаються, розміри тіла залишаються більшими від початкових. Тіло набуває залишкову деформацію ( $\Delta L_3$  на мал. 114).

Починаючи з певного навантаження, розміри тіла продовжують збільшуватися при майже сталому навантаженні (напрузі) – матеріал "тече". Цьому явищу відповідає горизонтальна ділянка CD діаграми розтягу, а напруга в тілі дорівнює т.зв. *границі текучості*  $\sigma_T$ .

Точка E діаграми розтягу відповідає границі міцності  $\sigma_M$  – максимальній напрузі, яку витримує тіло без руйнування його кристалічної структури. Точка K відповідає розриву зразка.

## ЗМІСТ

Від автора.....	3
Вступ.....	4
<b>ЧАСТИНА 1. МЕХАНІКА</b>	
<b>Розділ 1. КІНЕМАТИКА</b>	
Основне завдання механіки. Система відліку.....	5
Кінематичні характеристики.....	6
Вектори і скаляри. Дії з векторами.....	7
Проекції вектора. Розкладання вектора на складові.....	11
Рівномірний прямолінійний рух.....	13
Відносність руху.....	15
Середня і миттєва швидкість.....	17
Рівноприскорений прямолінійний рух.....	18
Вільне падіння тіл.....	20
Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту.....	22
Рівномірний рух по колу.....	25
<b>Розділ 2. ДИНАМІКА</b>	
Перший закон Ньютона.....	28
Принцип відносності Галілея.....	30
Маса.....	32
Сила. Рівнодійна сил.....	33
Другий закон Ньютона.....	35
Третій закон Ньютона.....	36
Сили пружності.....	37
Сили тертя.....	42
Сили тяжіння.....	45
Вага тіла. Невагомість.....	45
Залежність сили тяжіння від географічної широти місцевості.....	47
Динаміка обертального руху по колу.....	49
Вага тіла, що рухається опуклою або увігнутою поверхнею.....	50

Космічні швидкості.....	51
<b>Розділ 3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ</b>	
Закон збереження імпульсу.....	53
Робота. Потужність.....	54
Робота сил тяжіння, пружності та тертя.....	56
Механічна енергія.....	58
Закон збереження енергії.....	61
Коефіцієнт корисної дії (ККД).....	62
Абсолютно пружний та абсолютно непружний удари.....	63
<b>Розділ 4. СТАТИКА</b>	
Рівновага. Центр тяжіння. Центр мас.....	65
Умови рівноваги тіла.....	66
Додавання паралельних сил. Рівновага під дією паралельних сил.....	68
Види рівноваги.....	70
Рівновага тіла, яке має опору.....	71
Умови рівноваги простих механізмів.....	73
<b>Розділ 5. ГІДРО- І АЕРОДИНАМІКА</b>	
Закон Паскаля. Тиск у рідині.....	76
Гідравлічні машини (гідравлічний прес).....	78
Атмосферний тиск.....	79
Закон Архімеда.....	79
Рух рідини по трубах.....	82
<b>Частина 2</b>	
<b>МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА</b>	
<b>Розділ 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ</b>	
Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини та їх дослідне обґрунтування.....	85
Дифузія. Броунівський рух.....	86
Рух і взаємодія молекул.....	86

Розміри і маса молекул.....	89
Відносна молярна маса.....	90
Кількість речовини. Молярна маса.....	90
<b>Розділ 2. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ</b>	
Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.....	92
Температура і її вимірювання.....	94
Фізичний зміст абсолютної температури.....	96
Швидкості молекул.....	97
Рівняння стану ідеального газу.....	98
Закон Дальтона.....	100
Газові закони.....	100
<b>Розділ 3. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ</b>	
Внутрішня енергія. Кількість теплоти. Теплоємність.....	105
Перший закон термодинаміки.....	108
Застосування першого закону термодинаміки для вивчення ізопроеців в ідеальному газі.....	109
Другий закон термодинаміки.....	112
ККД теплового двигуна. Цикл Карно.....	113
<b>Розділ 4. ВЛАСТИВОСТІ РІДИН</b>	
Поверхневий натяг. Капілярні явища.....	116
Пароутворення і конденсація.....	118
Вологість повітря.....	122
<b>Розділ 5. ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ</b>	
Кристалічні й аморфні тіла. Анізотропія.....	123
Плавлення, кристалізація і сублімація.....	125
Деформація твердих тіл.....	127
Дефекти кристалічних решіток.....	129
Механічні властивості твердих тіл.....	130
Діаграма розтягу.....	132

Навчальне видання

*Пастушенко Сергій Миколайович*

Фізика

Визначення, закони, формули

Довідник для учнів

Книжка перша. Механіка. Молекулярна фізика

Редактор Плачинда Н. Н.

Макет підготовлено до друку НВП "Діал"

Комп'ютерна верстка та графіка Дьоміної Т. О.

Підписано до друку 12.04.96. Формат 60x84/32. Ум.- друк.  
арк. 4,00. Обл. – вид. арк. 4,25. Видавн. № 51–III. Замовл. №

КМУЦА, 252058, Київ, пр. Комарова, 1

НВП "Діал", 254205, Київ, а/с 319/3.

Надруковано у друкарні "Укртиппроєкт", Київ