

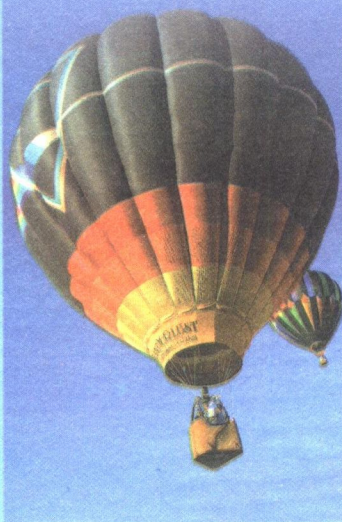
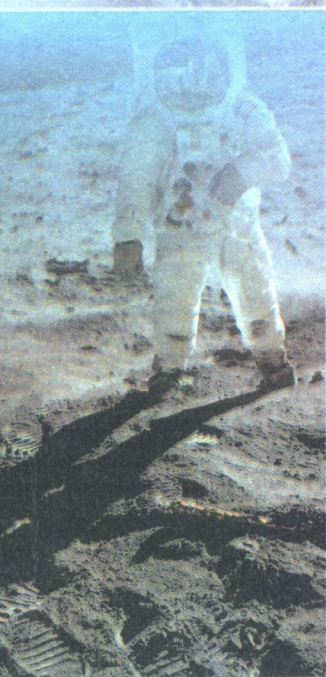
Є.В. КОРШАК, О.І. ЛЯШЕНКО, В.Ф. САВЧЕНКО

# ФІЗИКА



клас 10

Рівень стандарту





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

# фізика

клас

10

Підручник  
для загальноосвітніх  
навчальних закладів

*Рівень стандарту*

*Рекомендовано  
Міністерством освіти  
і науки України*

Київ  
«Генеза»  
2010

## Дорогий друже!

Упродовж трьох років ти вивчав фізику, оволодівав її основними поняттями і законами, досліджував фізичні явища і процеси, застосовував набуті знання для пояснення явищ природи, розв'язував задачі та виконував лабораторні роботи. Усе це дало можливість тобі сформувати науковий світогляд, виробити відповідний стиль мислення, що допоможе тобі у навчанні і здійсненні пізнавальної діяльності.

Фізика – це основа природничих наук. Її поняття і методи досліджень використовуються в осягненні сутності природничо-наукової картини світу. Тому фізика вважається світоглядною наукою, яка формує мислення людини, озброює її загальнонауковими методами пізнання, що потрібні кожній людині незалежно від її фаху чи особливостей професійної діяльності.

Сьогодні ти починаєш новий етап навчання, пов'язаний з підготовкою до свідомого вибору власного життєвого шляху, обранням майбутньої професії. Залежно від цього ти вивчатимеш фізику на різних рівнях опанування предмета. На обов'язковому рівні ти засвоїш основні закономірності перебігу фізичних явищ і процесів, у загальних рисах уявлятимеш фізичний світ, усвідомиш роль фізичних знань у житті людини і суспільному розвитку. На більш високому, академічному рівні передбачається глибше засвоєння фізичних законів і теорій, необхідне для широкого застосування та цілісного уявлення про природничо-наукову картину світу. У підручнику частина матеріалу подана для додаткового читання. Він необхідний для учнів, які хочуть глибше опанувати шкільний курс фізики, ніж того вимагає обов'язковий рівень, зокрема для тих, хто обирає фізику під час зовнішнього незалежного оцінювання.

У десятому класі ти вивчатимеш механіку і молекулярну фізику. На цьому етапі навчання фізики набуті раніше знання про механічні і теплові явища будуть теоретично узагальнені та поглиблені, одержать розширене трактування і сприятимуть опануванню наступних розділів фізики.

Щоб краще орієнтуватися в тексті підручника і засвоювати навчальний матеріал, звертай увагу на позначення, які використовуються в підручнику:



цікаві факти, додаткові відомості, дані про вчених



важливо знати, запам'ятати



для додаткового читання



актуалізуючі й контрольні запитання



## Навіщо та як вивчати фізику

---

4

Стародавні вчені вважали, що кожна людина від народження шукає відповіді на такі філософські питання: що таке навколишній світ, яку роль відіграє людина в навколишньому світі, які стосунки між людиною і навколишнім світом?

Власне, на ці питання прагнуть знайти відповідь усі науки, а не лише філософія. Природничі науки є основою створення наукової картини світу, формують світогляд людини, її науковий стиль мислення. Вони є також підґрунтям перетворюючої діяльності людини: створення техніки і технологій, розширення пізнавальних можливостей людства. Фізика, яка вивчає найпростіші явища природи, що порівняно легко спостерігаються, відтворюються, аналізуються, застосовуються для задоволення потреб людини і суспільства в цілому, є фундаментом природничих наук.

Історичний шлях здобуття фізичних знань полягає в тому, що спочатку нагромаджуються факти, потім вони аналізуються, систематизуються, висловлюються ідеї щодо їх пояснення, перевіряється справедливість висловлених ідей, тобто створюється теорія. А вже після цього здобуті знання можуть бути ефективно використані на практиці: для пояснення явищ навколишнього світу, для задоволення практичних потреб людства.

На першому етапі одержання фізичних знань першочергове значення мають спостереження, експеримент, практичний досвід людини. Саме через них найефективніше долучаються до наукових пошуків ті, хто опановує фізичну науку і готується до її розвитку та численних застосувань. Це розуміли давно. Уже в працях Уїльяма Гільберта (1544–1603) і Галілео Галілея (1564–1642), яких часто вважають основоположниками фізичної науки, знаходимо вказівки на виключне значення експери-

менту в процесі пізнання. У праці «Про магніт, магнітні тіла і про великий магніт – Землю» (Лондон, 1600) Гільберт писав: «Я передаю основи наук про магніт – новий рід філософії – тільки вам, справжні філософи, благородні мужі, що шукають знання не лише в книгах, а й у самих речах».

Експеримент важливий для вченого як підтвердження істинності одержаного знання, а для учня – як підготовка до майбутніх досліджень у галузі науки та її застосувань. Виконуючи досліди, учень оволодіває методами науки, які йому будуть потрібні для подальшого розвитку. Фізику поділяють на експериментальну й теоретичну. Але такий поділ цілком умовний, про що говорив Альберт Ейнштейн: «Мислення саме собою не приводить до знань про зовнішні об'єкти. Початковим пунктом усіх досліджень є чуттєве сприймання. Істинність теоретичного мислення досягається виключно за рахунок зв'язку його з усією сумою даних чуттєвого досвіду».

Виконання дослідницьких робіт, які є джерелом нових знань, нової навчальної інформації, найкраще розвиває творчий потенціал тих, хто вивчає фізику й інші природничі науки. Зрозуміло, що для цього потрібно навчитися ставити мету дослідження, обирати відповідні методи і засоби дослідження, планувати й виконувати експеримент, обробляти його результати, робити висновки та ефективно користуватися набутими знаннями й уміннями.

### Структура пошукової діяльності

1. Спостереження явища. Неможливість його пояснення на основі наявних знань (виникнення проблеми).
2. Формулювання гіпотези (гіпотез). Гіпотеза – таке припущення, при якому на основі ряду фактів можна зробити висновок про існування певного об'єкта, зв'язку між явищами або причини явищ. Наразі цей висновок не можна вважати повністю підтвердженим – його треба довести.
3. Планування перевірки гіпотези, зокрема експериментальної.
4. Експериментальна перевірка гіпотези.
5. Порівняння результатів експерименту з гіпотезою.
6. Підтвердження чи спростування гіпотези, її корекція чи заміна, внесення змін до початкової гіпотези.
7. Створення теорії, яка виникає, коли гіпотеза виявляється підтвердженою експериментально.
8. Застосування одержаних нових знань (теорії) для:
  - пояснення явищ (пояснювальна функція науки);
  - практичного застосування знання (перетворююча функція науки);
  - визначення подальших напрямків дослідження у даній галузі (прогностична функція науки).



Іноді тому, хто навчається, здається, що в науці вже все відомо, немає що нового відкривати. Проте це зовсім не так – із розвитком науки постає дедалі більше нових проблем, розв’язання яких лягає на плечі молодих дослідників, одним з яких станеш, можливо, саме ти. Ейнштейн говорив: «Наука не є і ніколи не буде закінченою книжкою. Кожний важливий успіх ставить нові запитання. Будь-який розвиток виявляє з часом нові, ще глибші проблеми».

## Фізичні величини. Одиниці фізичних величин



6

**Фізична величина** – це властивість, спільна в якісному відношенні для багатьох матеріальних об’єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них.

Фізика належить до точних наук. Тому фізики намагаються кількісно визначити властивості фізичних тіл, явищ і процесів, які вони вивчають. Це вони роблять за допомогою фізичних величин, що їх характеризують. Наприклад, час – це фізична величина, що визначає тривалість певної події; швидкість – темп переміщення тіла в просторі з часом;

сила характеризує взаємодію тіл тощо.

*Щоб кількісно визначити фізичну величину, необхідно обрати одиницю, з якою її порівнюють.* Вибір одиниці фізичної величини умовний. Наприклад, одиницею довжини можна обрати метрову лінійку або крок і виміряти відстань від дому до школи у метрах чи кроках відповідно. Проте результат вимірювання довжини за допомогою метрової лінійки буде вірогідніший за той, що одержано в кроках, оскільки довжина кроку в

**Для того щоб виміряти фізичну величину, необхідно визначити одиницю, з якою її будуть порівнювати.**

різних людей неоднакова, і тому кожний з нас отримає різні значення для однієї й тієї самої відстані.

У фізиці прийнято вказувати значення фізичної величини обов’язково з її одиницею. Воно складається з числового зна-

**Значення фізичної величини = числове значення + одиниця фізичної величини.**



числове  
значення  
величини

7 м/с

одиниця  
фізичної  
величини

чення та одиниці фізичної величини: 7 м/с; 3 г; 0,8 с; 26 км/год тощо. Не можна записувати числове значення величини без зазначення її одиниці, оскільки тоді немає можливості сказати про її розмір – вона більша чи менша за інші. Наприклад, довжини 30 см і 0,3 м мають різні числові значення, але вони однакові за розміром; ми знаємо, що 5 кг більше за 300 г, хоча число 300 значно більше за 5.

З метою упорядкування одиниць фізичних величин їх об'єднують у системи. Нині більшість країн світу використовують **Міжнародну систему одиниць** (скорочено СІ). В її основу покладено сім основних одиниць-еталонів, за допомогою яких визначають інші одиниці фізичних величин. Це одиниця довжини *метр*, одиниця часу *секунда*, одиниця маси *кілограм*, одиниця кількості речовини *моль*, одиниця температури *кельвін*, одиниця сили струму *ампер*, одиниця сили світла *кандела*.

На практиці для зручності часто застосовують **кратні і частинні одиниці**. Назви кратних і частинних одиниць утворюють за допомогою префіксів, які приєднують до основних назв одиниць: кілометр (км), декалітр (дал), мегаджоуль (МДж), сантиметр (см), мілілітр (мл), мікрограм (мкг), нанометр (нм). Слід зауважити, що не можна одночасно використовувати два префікси (наприклад, «мілікілограм» або «мікросантиметр»).

### Найуживаніші префікси СІ для утворення кратних і частинних одиниць

Назва префікса		Позначення	Множник
кратні	гіга	Г	$1\,000\,000\,000 = 10^9$
	мега	М	$1\,000\,000 = 10^6$
	кіло	к	$1000 = 10^3$
	гекто	г	$100 = 10^2$
	дека	да	$10 = 10^1$
частинні	деци	д	$0,1 = 10^{-1}$
	санти	с	$0,01 = 10^{-2}$
	мілі	м	$0,001 = 10^{-3}$
	мікро	мк	$0,000001 = 10^{-6}$
	нано	н	$0,000000001 = 10^{-9}$

## Вимірювання. Похибки вимірювання

Фізика як експериментальна наука ґрунтується на результатах дослідів. Тому спостереження, вимірювання та експеримент є основними методами наукового пізнання у фізиці.

Кількісно фізичні величини визначають за допомогою вимірювальних приладів і мірил: лінійок, мензурок, годинників, термометрів, терезів тощо. Це так зване **пряме вимірювання**. Одну й ту саму величину можна визначити різними способами. Наприклад, атмосферний тиск можна виміряти барометром-анероїдом, стрілка якого показує значення тиску, як у годиннику, або за висотою стовпчика ртуті в барометрі Е. Торрічеллі.

Проте не завжди фізичну величину можна виміряти безпосередньо, за допомогою приладу. У такому разі вчені діють інакше: вони шукають її значення опосередковано, на основі формул, які відображають співвідношення цієї величини з іншими, які можна виміряти. Наприклад, найчастіше саме так визначають швидкість тіла, вимірявши пройдений шлях і час руху:

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


Оскільки вимірювання завжди мають наближений характер (абсолютно точних вимірювань не існує), у фізиці оцінюють точність вимірювання фізичної величини за допомогою **абсолютної та відносної похибок вимірювань**. Вони залежать

від обраного методу вимірювання, класу точності засобів вимірювання, урахування систематичних похибок.

Наближення результату до істинного значення виміряної величини  $X_0$  характеризує абсолютна похибка вимірювань  $\Delta X$ :  $X = X_0 \pm \Delta X$ . Відносна похибка визначається як відсоткове відношення абсолютної похибки до значення величини  $X$ :


$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%.$$

Існує багато способів обчислення похибок, з якими ви ознайомитеся під час виконання лабораторних робіт. Найчастіше для прямих вимірювань абсолютна похибка дорівнює сумі інструментальної похибки (задається класом точності приладу) і похибки відліку (як правило, половина ціни поділки шкали приладу). Іноді, коли здійснюють прямі вимірювання однієї й тієї самої величини кілька разів, обчислюють також випадкову похибку вимірювання як відхилення одержаних результатів від середнього арифметичного значення величини.




**Фізичні величини можна визначити безпосередньо, за допомогою мірил і приладів, або визначити опосередковано, за формулою.**

8



**Похибка вимірювання є наслідком впливу на результат випадкових і закономірних факторів, які можна виявити і врахувати.**



**Інструментальна похибка зазначається в паспорті приладу.**



## Математика – мова фізики

Упродовж свого існування фізика завжди була тісно пов'язана з математикою. Багато розділів сучасної математики виникли саме завдяки необхідності розв'язання проблем, що з'явилися в процесі пізнання фізичного світу. Наприклад, для того щоб створити теоретичну основу класичної динаміки, І. Ньютон використав математичні моделі, які дали поштовх до створення нової математичної теорії, яка називається диференціальне числення. У свою чергу в доведенні своїх теоретичних положень і підтвердженні гіпотез фізики послуговуються математикою, її понятійним апаратом. Тому не випадково математику вважають мовою фізики.

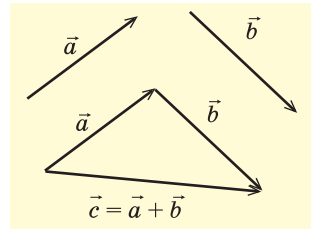
Фізичні величини, які є основою фізичного знання, за математичними властивостями бувають **скалярними** або **векторними**. Залежно від цього математичні дії з ними виконують за різними правилами. Зокрема, зі скалярними величинами (шлях, маса, робота, потужність тощо) діють як з дійсними числами. Наприклад, сума скалярних фізичних величин обчислюється як алгебраїчна сума їхніх числових значень.

Векторні величини (переміщення, швидкість, сила тощо) підлягають іншим настановам, з урахуванням їхнього напрямку. Зокрема, сума векторних величин обчислюється як геометрична сума векторів, результуюча якої також є вектором. Додають вектори, застосовуючи правило трикутника або правило паралелограма.

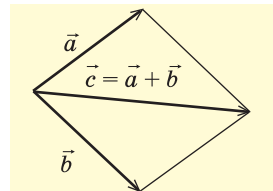
1. **Правило трикутника** (мал. 1): щоб додати два вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , треба від кінця вектора  $\vec{a}$  відкласти вектор  $\vec{b}$ ; тоді вектор  $\vec{c}$ , початок якого збігається з початком вектора  $\vec{a}$ , а кінець – з кінцем вектора  $\vec{b}$ , буде результуючим суми векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ .

2. **Правило паралелограма** (мал. 2): щоб додати два вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , треба сумістити початки цих векторів і побудувати на їх основі паралелограм, діагональ якого  $\vec{c}$  буде результуючим вектором суми векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ .

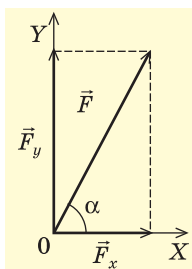
Будь-який вектор можна розкласти на складові, зокрема за осями прямокутної (декартової) системи координат (мал. 3). Цю властивість векторів часто використовують при розв'язуванні задач динаміки.



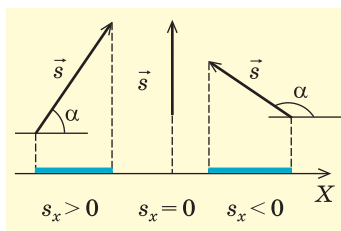
Мал. 1. Правило трикутника в доданні векторів



Мал. 2. Правило паралелограма в доданні векторів



Мал. 3. Розкладання вектора на складові



Мал. 4. Проекції вектора на координатну вісь

У кінематиці часто шукають **проекції вектора** на відповідну координатну вісь. Вони можуть бути додатними, від'ємними або дорівнювати нулю, оскільки враховують числове значення косинуса кута  $\alpha$  між вектором і координатною віссю (мал. 4):

$$s_x = |\vec{s}| \cos \alpha.$$

## Наближені обчислення

Зараз, коли людина володіє потужним арсеналом обчислювальної техніки (різноманітні калькулятори, комп'ютери тощо), дотримання правил наближених обчислень особливо важливе, щоб не спотворити вірогідність результату. Виконуючи будь-які обчислення, слід пам'ятати про точність результату, яку можна або треба (якщо її встановлюють) отримати. Так, *неприпустимо робити обчислення з більшою точністю, ніж це задано даними фізичної задачі або вимагається умовами експерименту*<sup>1</sup>. Наприклад, виконуючи математичні дії з числовими значеннями фізичних величин, які мають дві достовірні (значущі) цифри, не можна записувати результат розрахунків з точністю, що виходить за межі двох достовірних цифр, навіть якщо в підсумку маємо їх більше.

**Приклад.**  $2,7 \cdot 3,4 = 9,2$  (але не 9,18);  $72 : 53 = 1,4$  (але не 1,358...).

*Значення фізичних величин треба записувати, зазначаючи лише знаки достовірного результату.* Наприклад, якщо числове значення величини 39 600 має три достовірних знаки (абсолютна похибка результату дорівнює 100), то результат треба записати у вигляді  $3,96 \cdot 10^4$  або  $0,396 \cdot 10^5$ . У підрахунку достовірних цифр не беруться до уваги нулі зліва від числа.

*Щоб результат обчислень був коректним, його треба округлити, залишаючи лише дійсне значення величини.* Якщо чис-

<sup>1</sup> У шкільному лабораторному експерименті обчислення проводять, як правило, не більше як з двома значущими цифрами.

лове значення величини містить зайві (недостовірні) цифри, які переважають задану точність, то остання цифра, що зберігається, збільшується на 1 за умови, коли надлишок (зайві цифри) дорівнює або більший від половини значення наступного розряду числа.

**Приклад.** Округлення до трьох достовірних цифр:

а)  $0,46281 \approx 0,463$ ; б)  $1835 \approx 1840$ ; в)  $1,4817 \approx 1,48$ ;  
г)  $7,6394 \approx 7,60$ .

*У різних числових значеннях нуль може бути як достовірною, так і недостовірною цифрою.* Так, у прикладі б) він є недостовірною цифрою, а у г) – достовірною, значущою. У фізиці, якщо хочуть підкреслити достовірність розряду числового значення фізичної величини, у стандартному її виразі вказують «0». Наприклад, запис значення маси  $2,10 \cdot 10^{-3}$  кг вказує на три достовірні цифри результату і відповідну точність вимірювання, а значення  $2,1 \cdot 10^{-3}$  кг має лише дві достовірні цифри.

Слід пам'ятати, що результат дій з числовими значеннями фізичних величин є наближеним результатом, який враховує точність обрахунку або похибку вимірювань. Тому під час наближених обчислень варто керуватися такими **правилами підрахунку достовірних цифр**:

1. При виконанні математичних дій з числовими значеннями фізичних величин у їхньому результаті слід брати стільки достовірних знаків, скільки їх має числове значення з найменшою кількістю достовірних знаків.

2. В усіх проміжних підрахунках варто зберігати на одну цифру більше, ніж їх має числове значення з найменшою кількістю достовірних знаків. У кінцевому результаті ця «додаткова» цифра відкидається шляхом округлення.

3. Якщо окремі дані мають більше достовірних знаків, ніж інші, їхні значення попередньо слід округлити (можна зберегти одну «надлишкову» цифру) і після цього виконувати дії.

# Розділ 1



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

- ♦ різновиди механічного руху, означення траєкторії руху тіла, системи відліку, зміст основної задачі механіки та способи її розв'язання в кінематиці;
- ♦ фізичні величини, що характеризують механічний рух (шлях, переміщення, швидкість, прискорення, період обертання і обертова частота, кутова швидкість);
- ♦ принцип відносності механічного руху, закон додавання швидкостей.

Ви зможете **пояснити**:

- ♦ різницю між фізичним тілом і матеріальною точкою, шляхом і переміщенням;
- ♦ графіки рівномірного прямолінійного і рівноприскореного рухів;
- ♦ рух тіла при вільному падінні і кинутого вертикально вгору.

Ви будете **вміти**:

- ♦ розв'язувати задачі, застосовуючи рівняння руху у випадках рівномірного прямолінійного, рівноприскореного і рівномірного руху по колу;
- ♦ визначати дослідним шляхом прискорення тіл при рівноприскореному русі.



# КІНЕМАТИКА

13

Фізика вивчає різноманітні явища і процеси, що відбуваються довкола нас. Як вам відомо, залежно від їх природи розрізняють механічні, теплові, електричні, магнітні, світлові та інші фізичні явища. *Розділ фізики, який пояснює рух і взаємодію тіл, називається механікою.*

**Слово «механіка» вперше ввів Арістотель. Воно означає «машина».**



Механіка – одна з найдавніших наук. Виникнення і розвиток механіки пов'язані з потребами людини. Перші трактати з механіки, де розглядалися властивості простих механізмів і машин, з'явилися ще в Давній Греції. Значний внесок у її становлення зробили такі корифеї науки, як Арістотель (IV ст. до н. е.), Архімед (III ст. до н. е.), Леонардо да Вінчі (XV ст.), Галілео Галілей (XVII ст.) та інші. У завершеному вигляді, як класична теорія, вона отримала обґрунтування в праці Ісаака Ньютона «Математичні начала натуральної філософії» (1687 р.). Сучасна механіка у вигляді теорії відносності розроблена на початку XX ст. Альбертом Ейнштейном.

**Основна задача механіки** полягає у з'ясуванні закону або рівняння руху тіла за допомогою характеристик, що його описують: координат, довжини пройденого шляху,

**Основна задача механіки** полягає у визначенні рівнянь руху через його параметри.



переміщення, кута повороту, швидкості, сили тощо. Тобто якщо ми за допомогою цих фізичних величин зможемо визначити положення тіла в будь-який момент часу, то основна задача механіки вважається розв'язаною. Залежно від способів її розв'язання механіку ділять на три розділи: кінематика, динаміка і статика.



**У перекладі з грец. кінематика (*kinema-tos*) означає рух.**

**Кінематика** вивчає, як рухається тіло, не розглядаючи причин, які викликали саме такий рух. Тому кінематичні рівняння складають лише на підставі просторових харак-

теристик механічного руху: пройденого шляху, зміни координат, швидкості тощо, без урахування сил, що діють на тіло. Механічні явища ви вже вивчали у 8-му класі. Здобуті тоді знання про рух і взаємодію тіл стануть у нагоді вам зараз, під час вивчення курсу механіки як системи знань про рух.

## § 1. Механічний рух. Траєкторія руху

Найчастіше в житті ми спостерігаємо явище, яке називається механічним рухом. Наприклад, автомобіль їде дорогою, у небі плывуть хмари, дитина гоїдається, Місяць обертається навколо Землі тощо. В усіх цих випадках відбувається зміна положення одного тіла або його частин відносно інших. Щоб установити це, треба обрати тіло відліку, відносно якого

можна фіксувати положення рухомого тіла в будь-який момент часу. Тіло відліку обирається довільно. У наведених прикладах це може бути стовп або дерево біля дороги, будинок, поверхня Землі тощо.

Щоб описати рух тіла, треба точно знати його місце перебування в просторі в будь-який момент часу, тобто вміти визначати зміну положення тіла в просторі відносно інших тіл з часом. Як відомо, найпростіше це можна здійснити за допомогою системи координат. Наприклад, зафіксувати «адресу» тіла як певне його положення в просторі, виміривши відстані або кути в певній системі координат.

Так, у географії положення тіла на земній поверхні задається двома числами на перетині меридіана і паралелі, які називаються географічною довготою і широтою. У математиці «адресу» тіла найчастіше визначають за допомогою координат. Зокрема, у прямокутній (декартовій) системі координат на площині – це відстані  $x$  та  $y$  (мал. 1.1).

**Взаємні зміни положення тіла або його частин у просторі з часом називають механічним рухом.**



Систему координат, як правило, зв'язують з тілом відліку. Тоді рухоме тіло характеризується зміною положення тіла в просторі відносно тіла відліку, тобто зміною його координат у часі. Математично це записується так:  $x = x(t)$ ;  $y = y(t)$ .

Щоб установити таку зміну в будь-який момент часу, з тілом відліку і системою координат необхідно пов'язати засіб вимірювання часу, наприклад годинник. Тоді тіло відліку, систему координат, пов'язану з тілом відліку, і годинник у сукупності називають **системою відліку**.

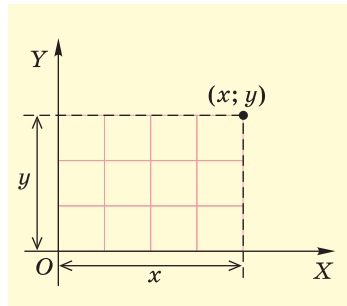
Як відомо, реальні фізичні тіла мають форму та об'єм, і тому задати їх положення в просторі не завжди можна однозначно, оскільки різні їх частини матимуть різні координати. Проте це завдання можна спростити, якщо не брати до уваги розміри тіла. Це можна робити лише за певних умов.

Щоб з'ясувати їх, розглянемо рух автомобіля. На значних відстанях, наприклад на шосе між Києвом і Харковом, розмірами автомобіля можна знехтувати, оскільки вони набагато менші за відстань, яку він проходить. Тому немає потреби розглядати особливості руху кожної з точок кузова автомобіля – вони будуть однаковими. У такому випадку його рух достатньо представити як рух однієї будь-якої його точки.

Отже, для спрощення опису руху фізичних тіл у випадках, коли їх розмірами за певних умов можна знехтувати, застосовують поняття матеріальної точки. **Матеріальна точка** – це умовне тіло, яке не має розмірів і визначає положення реального фізичного тіла в просторі координатами цієї точки. При поступальному русі, коли всі точки тіла переміщуються однаково, будь-яке тіло можна вважати матеріальною точкою.

Досить часто, крім рухомих тіл, ми спостерігаємо також і нерухомі, тобто такі, що перебувають у стані спокою. Проте в природі абсолютно нерухомих тіл не існує.

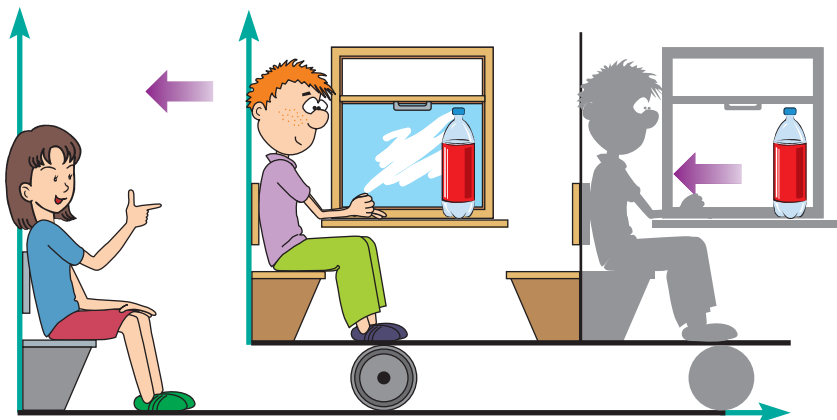
Розглянемо такий приклад. У вагоні на столі стоїть пляшка води (мал. 1.2). Під час руху потяга різні спостерігачі – пасажир у купе і проводжаючий, що перебуває на пероні, оцінять



Мал. 1.1. Прямокутна (декартова) система координат

**Матеріальна точка** – це фізична модель, ідеалізація, за допомогою якої представляють реальне фізичне тіло, нехтуючи його розмірами. Її геометричний образ – будь-яка точка тіла, яка не має розмірів.





Мал. 12. Відносність руху

16

її стан руху по-різному. Для пасажирки вона нерухома, оскільки відстань від нього до пляшки не змінюється. Для проводжаючого вона рухається, тому що з часом змінює положення в системі координат, пов'язаній з пероном.



**Стан спокою і стан руху тіл відносні, оскільки залежать від обраної системи відліку.**

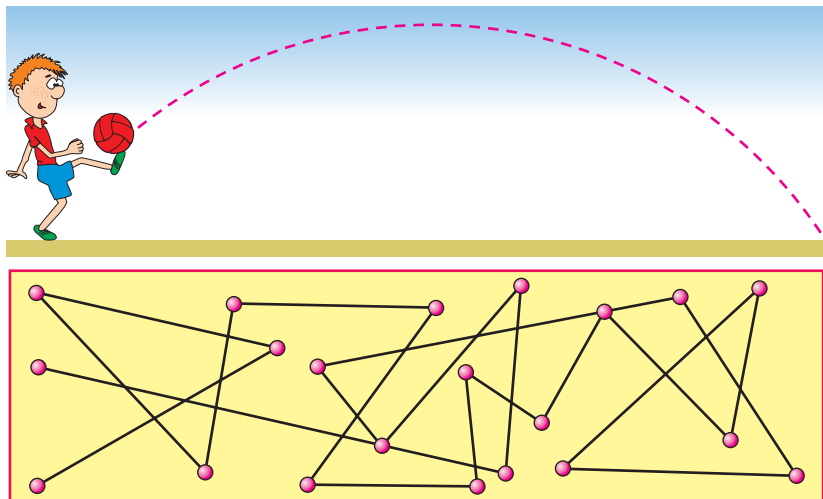
Отже, *стан спокою тіл є відносним, оскільки залежить від обраної системи відліку.* Тому в подальшому ми в першу чергу визначатимемося з системою відліку, оскільки від її обрання нерідко залежить складність рівнянь, що описують

рух. Як ми переконуємося під час розв'язування задач, правильний вибір системи веде до спрощення рівняння руху.

Розглянемо тепер рухоме тіло, послідовно фіксуємо його положення в певні моменти часу. Якщо сполучити всі точки, в яких послідовно перебувало тіло під час свого руху, то отримаємо уявну лінію, яка називається **траєкторією руху**. Траєкторія руху може бути видимою (слід від реактивного літака на небосхилі, лінія від олівця чи ручки під час запису в зошиті) і невидимою (політ пташки, рух тенісного м'яча тощо).

За формою траєкторії механічні рухи бувають **прямолінійними** і **криволінійними** (мал. 1.3). Траєкторія прямолінійного руху – пряма лінія. Наприклад, падіння кульки з певної висоти або рух візка по похилому жолобу. Під час криволінійного руху тіло переміщується за довільною кривою. Рух планет, політ м'яча, переміщення годинникової стрілки – це приклади криволінійного руху. Часто реальний рух тіл є комбінацією прямолінійного і криволінійного рухів. Так, переміщення автобуса за маршрутом є комбінованим: у ньому є і прямолінійні, й криволінійні ділянки.

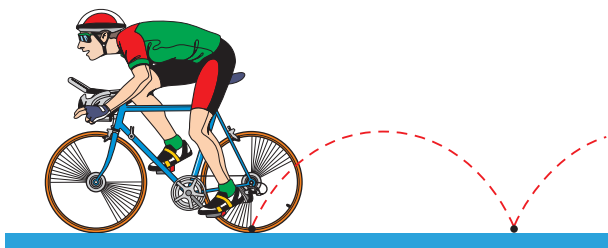




Положення броунівської частинки через певні інтервали часу

Мал. 1.3. Різні форми траєкторії

Оскільки рух відбувається в певній системі відліку, то і траєкторія руху розглядається відносно неї. Адже вона відображає послідовні положення тіла в певні моменти часу відносно обраної системи відліку. Тому в різних системах відліку вона може бути різною за формою. Наприклад, усі точки колеса велосипеда відносно його осі описують кола, проте в системі відліку, пов'язаній із землею, ця лінія більш складна (мал. 1.4).



Мал. 1.4. Траєкторія руху точки обода колеса велосипеда

1. Що вивчає кінематика?
2. У чому полягає основна задача механіки?
3. Що таке механічний рух?
4. Що називають системою відліку?
5. Що таке траєкторія руху?
6. Які бувають механічні рухи за формою траєкторії?
7. Чи залежить траєкторія руху тіла від системи відліку?
8. У яких випадках застосовують поняття матеріальної точки?



## § 2. Шлях і переміщення

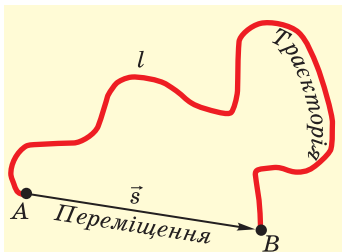
За траєкторією руху легко визначити шлях, пройдений тілом: досить виміряти довжину траєкторії між початком і кінцем руху. **Шлях** – це довжина траєкторії, яку описує тіло або матеріальна точка за певний час. Він позначається латинською літерою  $l$ . Ця фізична величина є скалярною, оскільки не має визначеного напрямку і характеризується лише значенням пройденого шляху.

У Міжнародній системі одиниць (СІ) шлях вимірюють у метрах. На практиці використовують також інші одиниці шляху, кратні і частинні його похідні – кілометр (км), сантиметр (см), міліметр (мм) тощо.

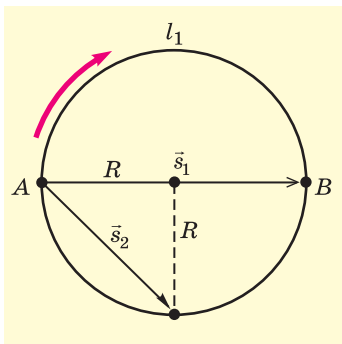
Досить часто, щоб більш повно схарактеризувати рух тіла і знати нове його положення, крім пройденого шляху (довжини траєкторії), важливо вказати ще й напрям, в якому рухалося тіло. Наприклад, щоб дістатися з одного селища в інше, водієві доводиться їхати звивистою дорогою (мал. 1.5). Пройдений шлях – це довжина дороги  $l$ , якою їхав автомобіль. Разом з тим водій здійснив переміщення з точки  $A$  в точку  $B$ , яке можна оцінити, сполучивши початкове і кінцеве положення тіла в просторі прямою лінією і вказавши напрям руху.

Отже, **напрявлений відрізок прямої, що сполучає початкове положення тіла з кінцевим, називається переміщенням**. Переміщення – векторна величина. Воно позначається латинською літерою  $\vec{s}$ . Його значення визначається модулем вектора переміщення  $|\vec{s}|$  або для спрощення запису – літерою  $s$ .

Шлях і переміщення за значенням можуть відрізнятися. Щоб переконатися в цьому, розглянемо рух велосипедиста по колу радіуса  $R = 100$  м (мал. 1.6). Нехай велосипедист стартує в точці  $A$ . Проїхавши половину кола, він опиниться в точці  $B$ . Пройдений ним шлях дорівнюватиме дузі півкола  $l_1 = \pi R = = 314$  м; відповідно, модуль переміщення дорівнюватиме  $s_1 = 2R = = 200$  м.



Мал. 1.5. Шлях і переміщення



Мал. 1.6. Рух велосипедиста по колу

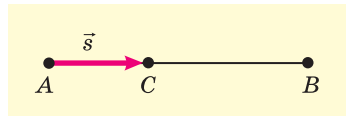
У момент, коли велосипедист пройде  $\frac{3}{4}$  кола, пройдений шлях дорівнюватиме  $l_2 = 2\pi R \cdot \frac{3}{4} = 471$  м; значення переміщення  $s_2 = R\sqrt{2} = 141$  м. У момент, коли велосипедист пройде повне коло, пройдений шлях дорівнюватиме  $l_3 = 2\pi R = 628$  м; модуль переміщення  $s_3 = 0$ . Отже, переміщення може дорівнювати нулю навіть тоді, коли тіло рухалося. Це має місце тоді, коли початкове і кінцеве положення тіла збігаються.

**Шлях і переміщення збігаються за значенням, якщо тіло рухається прямолінійно лише в одному напрямі.**



У розглянутому нами прикладі пройдений шлях і переміщення відрізняються одне від одного. Виникає природне питання: чи можуть вони збігатися, бути однаковими? Легко перекоонатися, що це трапиться у випадку, коли, *по-перше*, траєкторія руху буде прямою лінією, *по-друге*, рух відбуватиметься лише в один бік. На підтвердження розглянемо такий приклад.

Нехай автомобіль рухається прямолінійним шосе з пункту  $A$  у пункт  $B$ , а потім повертається в пункт  $C$ . Відстань між пунктами складає відповідно 2 км і 4 км, всі вони розміщені на одній прямій (мал. 1.7). Рухаючись із пункту  $A$  у пункт  $B$ , автомобіль проходить шлях  $l_{AB} = 2$  км + 4 км = 6 км і модуль його переміщення також дорівнює 6 км:  $s_{AB} = 6$  км. Тобто в даному випадку шлях і переміщення збігаються:  $l_{AB} = s_{AB}$ . Після того як автомобіль розвернувся і приїхав у пункт  $C$ , його переміщення дорівнює  $s_{AC} = 2$  км, а пройдений шлях становитиме  $l_{AC} = l_{AB} + l_{BC} = 6$  км + 4 км = 10 км, тобто пройдений шлях і переміщення неоднакові:  $l_{AC} \neq s_{AC}$ .



Мал. 1.7. Шлях і переміщення автомобіля

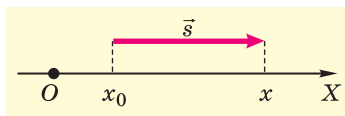
Таким чином, *пройдений шлях і переміщення за значенням однакові лише в тому разі, якщо тіло рухається вздовж прямої і не змінює напрямку руху.*

1. Що таке пройдений тілом шлях і переміщення?
2. Чим відрізняється переміщення від пройденого шляху?
3. Чому дорівнює переміщення кінця годинникової стрілки за добу? А за 3 год?
4. Коли значення пройденого шляху і переміщення будуть однаковими?



### § 3. Рівномірний прямолінійний рух

Найпростішим видом механічного руху є рівномірний прямолінійний рух. Це такий рух, під час якого *тіло, рухаючись уздовж прямої, за будь-які однакові інтервали часу здійснює однакові переміщення*. Траєкторія такого руху – пряма лінія. Тому його можна описати зміною однієї з координат, наприклад  $x = x(t)$ , якщо систему відліку обрати так, щоб координатна вісь збігалася з напрямом руху.



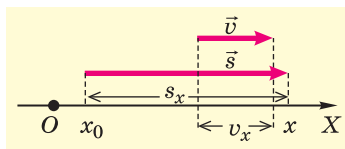
Мал. 1.8. Зміна координат тіла під час руху

Нехай тіло в момент початку руху знаходиться в точці з координатою  $x_0$  (мал. 1.8); через деякий час, здійснивши переміщення  $\vec{s}$ , воно матиме координату  $x$ . Переміщення, яке визначає зміну положення тіла в просторі з часом, може відбуватися з різною швидкістю.

**Швидкість рівномірного руху** – це фізична величина, що дорівнює відношенню переміщення до часу, протягом якого воно відбулося:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \quad (1)$$

Як відомо, у СІ швидкість вимірюється в метрах за секунду (м/с). 1 м/с – це швидкість такого рівномірного прямолінійного руху, за якої тіло за 1 с здійснює переміщення 1 м. На практиці використовують й інші одиниці швидкості, наприклад кілометр за годину (км/год) тощо. Так,  $1 \frac{\text{км}}{\text{год}} = \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = \frac{10 \text{ м}}{36 \text{ с}}$ .



Мал. 1.9. Проекції переміщення і швидкості на вісь  $OX$

Оскільки переміщення  $\vec{s}$  – векторна величина, а час  $t$  – скалярна, яка завжди більша за 0, то швидкість також векторна величина, напрям якої збігається з напрямом переміщення (мал. 1.9). У разі рівномірного руху значення швидкості залишається сталим, оскільки за будь-які рівні інтервали часу здійснюються однакові переміщення.

Як відомо, основною задачею механіки є визначення положення тіла в просторі у будь-який момент часу. Отже, щоб її розв'язати, треба знайти координати тіла або їх зміну в часі:  $x = x(t)$ . У механіці таке рівняння називається **рівнянням руху**. При розв'язуванні задач векторні фізичні величини, що характеризують рух тіла, записують у проекціях на відповідну вісь.

Отже, з формули (1) маємо:

$$v_x = \frac{s_x}{t}, \text{ звідси } s_x = v_x t. \quad (2)$$

З малюнків 1.8 і 1.9 зрозуміло, що  $s_x = x - x_0$ . Використавши формулу (2), отримаємо **рівняння рівномірного прямолінійного руху**:

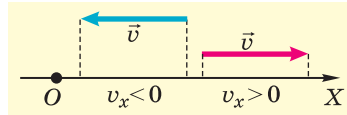
$$x - x_0 = v_x t, \text{ отже, } x = x_0 + v_x t. \quad (3)$$

**Рівняння рівномірного прямолінійного руху:**

$$\begin{aligned} \vec{s} &= \vec{v}t; \\ s_x &= v_x t; \\ x &= x_0 + v_x t. \end{aligned}$$



Розглянемо різні випадки рівномірного прямолінійного руху (мал. 1.10). З малюнка видно, якщо напрям руху тіла збігається з напрямом координатної осі, то  $v_x > 0$  і координата з плином часу збільшуватиметься:  $x = x_0 + vt$ , де  $v$  – модуль швидкості. Якщо ж напрям руху тіла протилежний до напрямку координатної осі, то  $v_x < 0$  і координата з плином часу зменшуватиметься:  $x = x_0 - vt$ .



Мал. 1.10. Проекції вектора швидкості

1. Який рух називається рівномірним прямолінійним?
2. Що таке швидкість? Чому швидкість – векторна величина?
3. Які одиниці швидкості вам відомі? Які співвідношення між ними?
4. Що таке рівняння руху?
5. Чому для знаходження значення швидкості використовують її проекцію?



## § 4. Як розв'язувати задачі кінематики

Розв'язування будь-якої фізичної задачі до певної міри може бути умовно поділене на три етапи: фізичний, математичний та аналіз розв'язку.

*На фізичному етапі:*

- ✓ аналізують умову задачі та опис фізичної ситуації, поданої в умові;
- ✓ з'ясовують фізичну модель явища, покладеного в основу задачі;
- ✓ репрезентують фізичну модель явища в графічній формі (малюнки, креслення, схеми, графіки тощо);
- ✓ роблять скорочений запис умови задачі у систематизованому вигляді.

*На математичному етапі:*

- ✓ пропонують математичну модель задачі, складають загальні рівняння, що описують фізичні явища, зазначені в умові задачі;
- ✓ визначають конкретні умови й параметри, за яких відбувається явище;
- ✓ конкретизують загальні рівняння у вигляді часткових розв'язків аналітичним, графічним або числовим способом, виконують обчислення.

*На етапі аналізу розв'язку:*

- ✓ проводять перевірку одиниць фізичних величин і знаходять значення шуканих величин;
- ✓ аналізують результати, їх вірогідність і реальність;
- ✓ шукають інші методи розв'язування задачі й обирають найраціональніший.

У процесі розв'язування задач кінематики головне полягає в тому, щоб за заданими параметрами руху (координати, переміщення, швидкість тощо) записати рівняння руху. Або навпаки, якщо рівняння руху відоме, шукають фізичні величини, що його описують.

22

Розв'язування задач кінематики підпорядковується певній послідовності розумових дій, так званому алгоритму, за допомогою якого пошук розв'язку фізичної задачі упорядковується і значно полегшується. Наведемо його як послідовність кроків, яких варто дотримуватися в процесі розв'язування задачі.

*Крок 1.* За даними умови задачі оберіть систему відліку, в якій буде розглядатися рух тіла. Визначте початкові значення координат, пов'язавши їх з обраним тілом відліку.

*Крок 2.* Визначте характер руху (рівномірний, нерівномірний) та вид траєкторії (прямолінійна, криволінійна).

*Крок 3.* Зробіть малюнок, який ілюструє фізичні явища, зазначені в умові задачі. Пов'яжіть малюнок з обраною системою відліку, зазначте на ньому векторні фізичні величини.

*Крок 4.* Побудуйте проєкції переміщення, швидкості, інших векторних величин і запишіть рівняння руху тіла в загальному вигляді. У разі необхідності, якщо кількість невідомих більша, ніж кількість рівнянь, складіть додаткові рівняння, що пов'язують кінематичні величини.

*Крок 5.* Розв'яжіть рівняння відносно шуканих величин. Визначте їхнє значення та оцініть їхню вірогідність.

*Крок 6.* Проаналізуйте отриману відповідь. Якщо вона суперечить фізичному змісту задачі, шукайте нові ідеї щодо її розв'язання.

*Крок 7.* Здійсніть пошук інших можливих шляхів розв'язування даної задачі. Розв'яжіть задачу кількома способами і

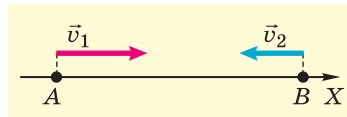
порівняйте результати. Оцініть, який з розв'язків найраціональніший.

**Задача.** З пунктів  $A$  і  $B$ , розташованих на відстані 80 км один від одного, одночасно почали рух назустріч два велосипедисти. Перший мав швидкість 5 м/с, другий 3 м/с. Визначити:

- 1) через який час вони зустрінуться і де це відбудеться;
- 2) який шлях вони пройдуть до моменту зустрічі та яке здійснять переміщення;
- 3) через який час від початку руху відстань між ними буде 20 км.

### Розв'язання

1. Оберемо систему відліку таким чином, щоб початок координат збігався з пунктом  $A$ . У загальній формі рівняння руху тіла має такий вигляд:  $x = x_0 + v_x t$ . Запишемо тепер його для кожного з велосипедистів окремо. Оскільки для першого велосипедиста початкова координата  $x_0$  дорівнює 0, проекція швидкості  $v_x > 0$ , а її модуль дорівнює за умовою 5 м/с, то рівняння руху матиме вигляд:  $x_1 = 5t$ .



Для другого велосипедиста  $x_0 = 80$  км,  $v_x < 0$ ,  $v_2 = 3$  м/с, отже,  $x_2 = 80\,000 - 3t$ .

Унаслідок руху з плином часу координати обох тіл змінюються: у першого вона зростає, у другого – зменшується. У момент їх зустрічі координати обох велосипедистів збігаються:  $x_1 = x_2$ . Підставивши відповідні рівняння руху, одержимо рівняння з одним невідомим:

$$5t = 80\,000 - 3t; \quad 8t = 80\,000; \quad \text{звідси } t = 10\,000 \text{ с} = 2,8 \text{ год.}$$

Отже, велосипедисти зустрінуться через 2,8 год. Місце їх зустрічі визначають координати  $x_1$  і  $x_2$ , які можна знайти з рівняння руху кожного з тіл, підставивши в нього час  $t = 10\,000$  с:

- а)  $x_1 = 5t = 5 \text{ м/с} \cdot 10\,000 \text{ с} = 50\,000 \text{ м} = 50 \text{ км}$ ;
- б)  $x_2 = 80\,000 - 3t = 80\,000 \text{ м} - 3 \text{ м/с} \cdot 10\,000 \text{ с} = 50\,000 \text{ м} = 50 \text{ км}$ .

2. Оскільки велосипедисти рухалися прямолінійно і не змінювали напрямку руху, то пройдений ними шлях дорівнюватиме модулю переміщення (або його проекції):

$$l_1 = |s_{x1}| = |x_1 - x_0| = v_1 t = 5 \text{ м/с} \cdot 10\,000 \text{ с} = 50\,000 \text{ м} = 50 \text{ км};$$

$$l_2 = |s_{x2}| = |x_2 - x_0|; \quad x_2 = 50\,000 \text{ м}, \quad x_0 = 80\,000 \text{ м}; \quad l_2 = 30 \text{ км}.$$

$$\text{Або } l_2 = |s_{x2}| = v_2 t = 3 \text{ м/с} \cdot 10\,000 \text{ с} = 30\,000 \text{ м} = 30 \text{ км}.$$

3. Щоб знайти час, коли відстань між тілами дорівнюватиме 20 км, достатньо записати рівності  $x_1 - x_2 = 20$  км або  $x_2 - x_1 = 20$  км та підставити в них відповідні рівняння руху велосипедистів.

$$5t - 80\,000 + 3t = 20\,000; 8t = 100\,000; t = 12\,500 \text{ с} = 3,5 \text{ год.}$$

$$80\,000 - 3t - 5t = 20\,000; 8t = 60\,000; t = 7500 \text{ с} = 2,1 \text{ год.}$$

Чим можна пояснити дві різні відповіді? Якщо проаналізувати умову задачі, то можна помітити, що на відстані 20 км один від одного велосипедисти будуть двічі – коли їдуть назустріч один одному (2,1 год) і коли роз'їжджаються після зустрічі, продовжуючи рух (3,5 год).

### Вправа 1

1. Людина проходить алеєю парку 20 м до перехрестя з іншою алеєю. Потім вона повертає під кутом  $90^\circ$  на іншу алею і проходить ще 15 м. Знайти переміщення і пройдений людиною шлях.

2. Автомобіль проїхав 3 км прямою дорогою, яка плавно переходить у кільцеву. Після проходження ним півкільця його переміщення становило 5 км. Знайти радіус кільцевої ділянки дороги і пройдений автомобілем шлях.

3\*. Велосипедист їде прямою дорогою зі швидкістю 20 км/год. Через півгодини він повертає назад і рухається з тією самою швидкістю протягом 45 хв. Знайти пройдений велосипедистом шлях і модуль його переміщення за час руху, а також його координати перед розвертанням і в кінці руху.

4. Перший автомобіль здійснив за 20 с таке саме переміщення, як і другий автомобіль за 10 с, рухаючись зі швидкістю 72 км/год. Чому дорівнювала швидкість першого автомобіля?

5\*. Потяг завдовжки 120 м рівномірно рухається мостом зі швидкістю 18 км/год. За який час він повністю перетне міст, якщо його довжина 240 м?

6. Під час руху вздовж прямої координата тіла змінилася за 5 с від значення 10 м до значення  $-10$  м. Які модуль і напрям швидкості?

## § 5. Графіки рівномірного прямолінійного руху

Щоб краще усвідомити особливості змін параметрів рівномірного руху (координат, шляху, переміщення, швидкості) з часом, розглянемо відповідні графічні залежності, які випливають з рівняння руху.

\* Зірочкою позначено задачі підвищеної складності.

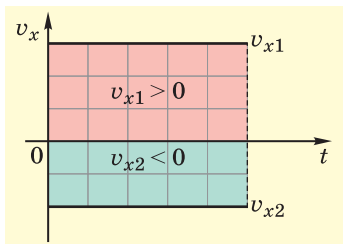


1. **Графік швидкості  $v = v(t)$ .** Як відомо, швидкість тіла при рівномірному прямолінійному русі з часом не змінюється, тобто  $v = \text{const}$ . Тому графік швидкості – це пряма, паралельна осі часу  $t$ , яка розміщена над нею, якщо проекція швидкості додатна (мал. 1.11), або під нею, коли вона від'ємна. Пройдений тілом шлях графічно визначається, як площа прямокутника, обмеженого графіком модуля швидкості і перпендикуляром, опущеним на вісь часу  $t$  в точку, яка відповідає часу руху.

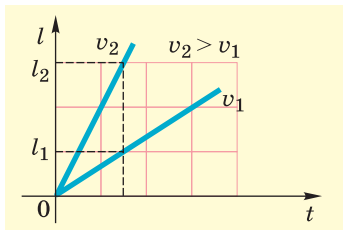
2. **Графік шляху  $l = l(t)$ .** З формули шляху  $l = vt$  випливає, що між пройденим шляхом і часом існує прямо пропорційна залежність. Графічно вона зображається прямою, що проходить через початок координат (адже шлях не може набувати від'ємних значень). Залежно від значення швидкості нахил прямих буде різним (мал. 1.12): *чим більша швидкість, тим крутіше здійснюється графік*.

3. **Графік проекції переміщення  $s_x = s_x(t)$ .** Оскільки проекція переміщення може набувати як додатних, так і від'ємних значень, відповідно графік проекції переміщення (мал. 1.13) може здійснюватися вгору (проекція переміщення додатна) або спадати вниз (проекція переміщення від'ємна). Графік проекції переміщення завжди проходить через початок координат. Кут нахилу прямої, як і в разі графіка шляху, залежить від значення швидкості: чим вона більше, тим крутіший графік проекції переміщення.

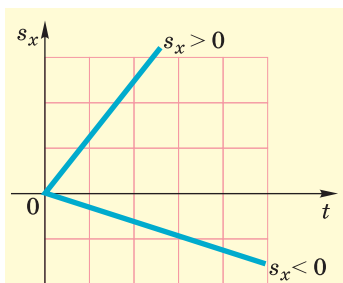
Якщо тіло змінює напрям руху – спочатку рухається в один бік, а потім повертається назад, то графік проекції переміщення матиме вигляд, зображений на малюнку 1.14 (у момент часу  $t_1$  тіло змінило напрям руху і почало рухатися у зворотний бік).



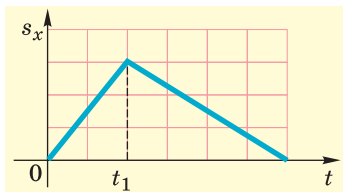
Мал. 1.11. Графік швидкості



Мал. 1.12. Графік шляху

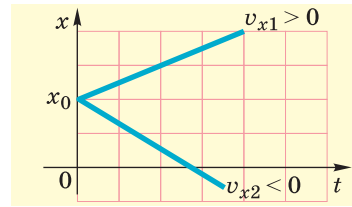


Мал. 1.13. Графік проекції переміщення

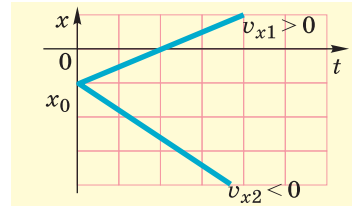


Мал. 1.14. Графік проекції переміщення, коли тіло змінює напрям руху

4. **Графік руху тіла  $x = x(t)$**  характеризує зміну координат тіла з часом. З рівняння руху  $x = x_0 + v_x t$  видно, що це лінійна функція і зображається вона прямою. Ця пряма проходить через початок координат, коли  $x_0 = 0$ . Вона зміщена на  $x_0$ , якщо  $x_0 \neq 0$  (мал. 1.15 і 1.16). Оскільки проекція швидкості може мати додатні й від'ємні значення (напрямок вектора швидкості може збігатися або бути протилежним до обраного напрямку координатної осі), то графік може здійматися вгору ( $v_x > 0$ ) або спадати вниз ( $v_x < 0$ ). На поданих графіках відтворено залежність координати тіл, які в початковий момент були в одній точці з координатою  $x_0 > 0$  (мал. 1.15) і  $x_0 < 0$  (мал. 1.16), але рухалися в протилежних напрямках  $v_{x1} > 0$  і  $v_{x2} < 0$ .




Мал. 1.15. Графік руху тіла, коли  $x_0 > 0$



Мал. 1.16. Графік руху тіла, коли  $x_0 < 0$

26

Таким чином, за допомогою графіків руху можна з'ясувати характер руху тіла і зміни відповідних величин (координат, пройденого тілом шляху і переміщення, швидкості) з часом  $t$ .

- 
1. Який вигляд має графік швидкості при рівномірному прямолінійному русі?
  2. Який вигляд має графік пройденого шляху? Від чого залежить кут нахилу прямої графіка?
  3. Чим відрізняється графік шляху від графіка проекції переміщення?
  4. У якому випадку графік рівномірного руху тіла виходить з початку координат?
  5. Графік руху перетинає вісь часу. Що це означає?



## § 6. Приклади розв'язування задач

**Задача.** За графіком руху (мал. 1.17):

- 1) визначити швидкість руху тіл;
- 2) скласти рівняння руху обох тіл;
- 3) визначити переміщення тіл за 4 с;
- 4) знайти час і місце їхньої зустрічі;
- 5) визначити відстань між тілами через 2 с після початку руху;

б) побудувати графіки швидкості, проекції переміщення та шляху.

### Розв'язання

1) Швидкість тіла визначається за формулою  $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ ;  $v_x = \frac{s_x}{t} = \frac{x - x_0}{t}$ .

Час зміни координат тіла обираємо довільно, керуючись зручністю розрахунків. Наприклад, візьмемо  $t = 2$  с. Тоді тіло 1 через 2 с матиме координату 6 м; його початкова координата  $x_0 = 0$ . Отже, швидкість тіла 1 дорівнюватиме:

$$v_{x1} = \frac{6 \text{ м} - 0}{2 \text{ с}} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_1 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

У тіла 2 початкова координата  $x_0 = 4$  м, а через 2 с її координата буде 2 м. Отже, швидкість тіла 2 дорівнюватиме:

$$v_{x2} = \frac{2 \text{ м} - 4 \text{ м}}{2 \text{ с}} = -1 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_2 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2) Рівняння руху для обох тіл матимуть такий вигляд:

$$x_1 = 3t; x_2 = 4 - t.$$

3) Переміщення тіл за час  $t = 4$  с дорівнюватиме:

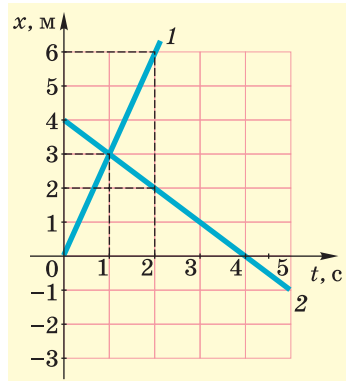
$$s_{x1} = 3t, s_{x1} = 12 \text{ м}, s_1 = 12 \text{ м};$$

$$s_{x2} = -t, s_{x2} = -4 \text{ м}, s_2 = -4 \text{ м}.$$

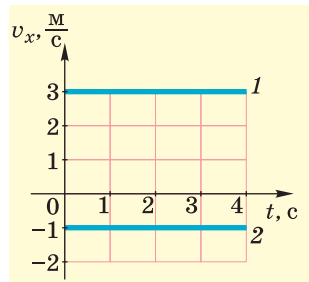
4) У момент зустрічі тіл їхні координати однакові, тобто це точка перетину графіків. Перпендикуляр, проведений до осі координат, укаже координату зустрічі, рівну 3 м. Для визначення часу зустрічі необхідно опустити перпендикуляр на вісь часу  $t$ ; тоді одержимо  $t = 1$  с.

5) Згідно з графіками руху тіл через 2 с тіло 1 матиме координату  $x_1 = 6$  м, а тіло 2 – координату  $x_2 = 2$  м. Таким чином, відстань між тілами буде дорівнювати:  $l = |x_1 - x_2| = 4$  (м).

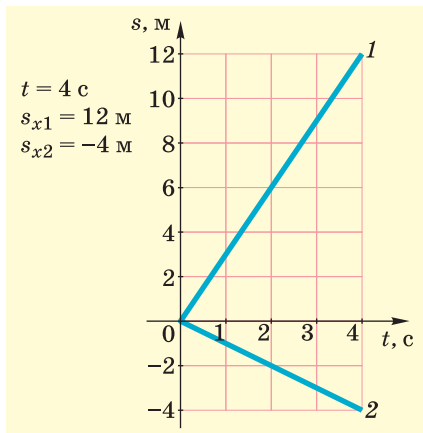
6) Використовуючи дані попередніх розв'язків задачі, побудуємо відповідні графіки (мал. 1.18–1.20).



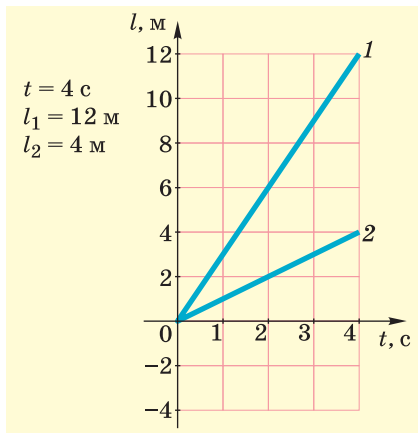
Мал. 1.17



Мал. 1.18



Мал. 1.19



Мал. 1.20

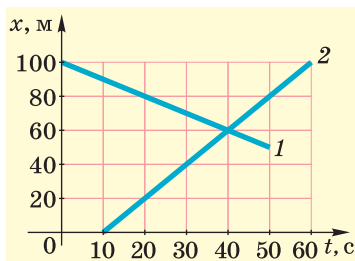
## Вправа 2

28

1. Рух тіл уздовж прямої задано рівняннями:  $x_1 = 5t$ ,  $x_2 = 150 - 10t$ . Визначити час і місце їхньої зустрічі. Розв'язати цю задачу алгебраїчним і графічним способами.

2\*. З пунктів  $A$  і  $B$ , відстань між якими дорівнює 160 м, одночасно в одному напрямі починають рухатися два тіла зі швидкостями 10 м/с і 6 м/с відповідно. Через який час перше тіло наздожене друге? На якій відстані від  $A$  і  $B$  це станеться? Через який час відстань між тілами буде дорівнювати 20 м? Розв'язати цю задачу також графічно.

3. На малюнку 1.21 зображено графіки руху двох тіл. Схарактеризувати ці рухи і записати рівняння їхнього руху. Визначити швидкості руху цих тіл, час і місце їхньої зустрічі, відстань між ними через 20 с від початку руху другого тіла. Побудувати графіки проекції швидкості  $v_x = v_x(t)$  для обох тіл.



Мал. 1.21. Графіки руху тіл

4. Тіло рухається рівномірно зі швидкістю 36 км/год у протилежному напрямі від обраного напрямку осі  $Ox$ . Його початкова координата дорівнювала 20 м. Знайти положення тіла через 4 с після початку руху, пройдений ним шлях і проекцію переміщення.

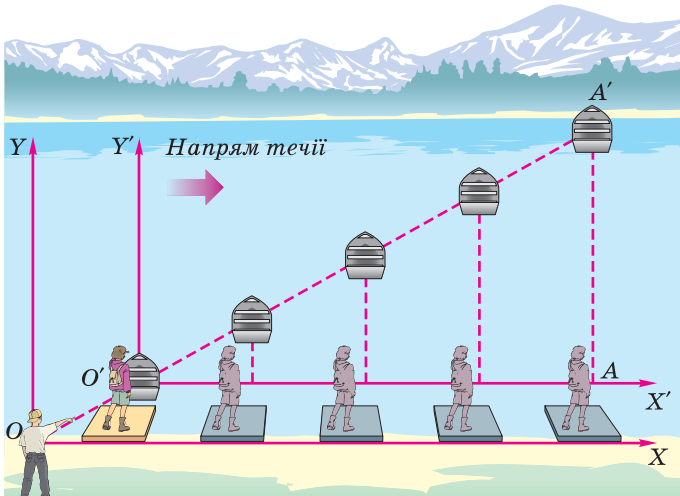
## § 7. Вігносність руху. Закон доганання швидкостей

Щоб описати механічний рух і визначити його параметри – траєкторію, переміщення, пройдений шлях, швидкість тощо, треба насамперед обрати систему відліку і проаналізувати рух тіла або матеріальної точки відносно певного тіла відліку, яке обирається довільно. Тому в природі може існувати безліч систем відліку, і опис руху може одночасно здійснюватися в кожній з них. Наприклад, човен, що пливе річкою, рухається відносно її берегів, відносно теплохода, який пливе поруч, відносно автобуса, що їде мостом, відносно пішоходів, що йдуть берегом, і т. д.

Найчастіше систему відліку пов'язують з тілом, яке в даній ситуації вважається нерухомим: із землею, берегом річки, населеним пунктом, залізничною колією, стовпом на узбіччі дороги тощо. Така система відліку вважається **нерухомою**.

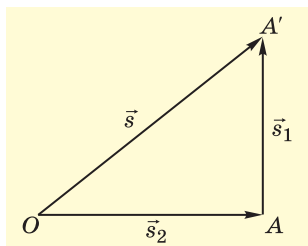
З іншими тілами, що рухаються в нерухомих системах відліку рівномірно і прямолінійно, пов'язують **рухомі системи відліку**. Слід пам'ятати, що вдалий вибір системи відліку багато спрощує розв'язування задачі.

Розглянемо рух будь-якого тіла, наприклад човна, що пливе річкою, в різних системах відліку (мал. 1.22). Нехай човен перетинає річку перпендикулярно до течії. За рухом човна стежать два спостерігачі – один з берега річки (нерухома система відліку  $XOY$ ), другий з плоту, який рухається відносно берега зі швидкістю течії річки (рухома система відліку  $X'O'Y'$ ).



Мал. 1.22. Вігносність руху

Перший спостерігач бачитиме переміщення човна вздовж прямої  $OA'$ . Другий спостерігач, перебуваючи в рухомій системі відліку, побачить зовсім інше: човен весь час віддалятиметься від нього по прямій, перпендикулярній до течії, і коли човен досягне протилежного берега в точці  $A'$ , пліт перебуватиме точно навпроти нього в точці  $A$ .



Мал. 1.23. Переміщення човна в різних системах відліку

Таким чином, відносно рухомої системи відліку човен здійснив переміщення  $\vec{s}_1 = \overline{AA'}$  (мал. 1.23), відносно нерухомої системи відліку він здійснив переміщення  $\vec{s} = \overline{OA'}$ . Сама ж рухома система за цей час здійснила переміщення  $\vec{s}_2 = \overline{OA}$ . За правилом додавання векторів маємо:  $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ . Таким чином, додавання переміщень, що відбуваються в різних системах відліку, виконують за правилами додавання векторів.

Поділивши кожний член даного рівняння на час руху  $t$ , який однаковий для нерухомої і рухомої систем відліку, одержимо:

$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}, \text{ звідси } \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2. \quad (1)$$

Рівняння (1) називають **законом додавання швидкостей**, який стверджує, що *швидкість тіла у нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла в рухомій системі відліку і швидкості самої рухомої системи відліку відносно нерухомої*. Додавання швидкостей у такому разі також виконують за правилами додавання векторів.

Рух тіла в рухомій системі відліку називають **відносним**, рух самої рухомої системи відліку відносно нерухомої є **переносним**. Таким чином, механічний рух відносно різних систем відліку може бути представлений незалежними рухами: а) відносним рухом тіла в рухомій системі відліку; б) переносним рухом рухомої системи відліку відносно нерухомої. Відповідно до цього твердження закон додавання швидкостей набуває вигляду:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{відн}} + \vec{v}_{\text{пер}}, \quad (2)$$

тобто *швидкість тіла в нерухомій системі відліку дорівнює геометричній сумі відносної і переносної швидкостей*.



**Швидкість тіла в нерухомій системі відліку інколи називають абсолютною.**

**Задача.** Моторний човен пливе річкою від одного селища до іншого, відстань між якими 30 км. Швидкість човна у стоячій воді 20 км/год, а швидкість течії річки відносно берегів 10 км/год. Визначити час, за який човен подолає відстань між селищами, рухаючись спочатку за течією, а потім – повертаючись назад, проти течії.

Дано:

$$l = 30 \text{ км},$$

$$v_{\text{ч}} = 20 \text{ км/год},$$

$$v_{\text{т}} = 10 \text{ км/год}.$$

$$t_1 = ?$$

$$t_2 = ?$$

Розв'язання

Відповідно до закону додавання швидкостей

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{відн}} + \vec{v}_{\text{пер}}.$$

У скалярній формі, взявши до уваги знаки проекції швидкостей, одержимо:

$$v_1 = v_{\text{ч}} + v_{\text{т}} \text{ (за течією),}$$

$$-v_2 = -v_{\text{ч}} + v_{\text{т}} \text{ (проти течії).}$$

Таким чином, час руху човна між селищами за течією становить:

$$t_1 = \frac{l}{v_1} = \frac{l}{v_{\text{ч}} + v_{\text{т}}}, \quad t_1 = \frac{30 \text{ км}}{20 \frac{\text{км}}{\text{год}} + 10 \frac{\text{км}}{\text{год}}} = 1 \text{ год}.$$

Час руху човна проти течії:

$$t_2 = \frac{l}{v_2} = \frac{l}{v_{\text{ч}} - v_{\text{т}}}, \quad t_2 = \frac{30 \text{ км}}{20 \frac{\text{км}}{\text{год}} - 10 \frac{\text{км}}{\text{год}}} = 3 \text{ год}.$$

**Відповідь:**  $t_1 = 1$  год,  $t_2 = 3$  год.

1. Що треба зробити насамперед, щоб описати будь-який рух?
2. Автомобіль рухається дорогою. Назвіть кілька систем відліку, за допомогою яких можна описати його рух. У якій системі він буде нерухомий?
3. Що таке рухома і нерухома системи відліку?
4. Хлопчик перепливає річку. Як можна знайти його переміщення відносно берегів? А якщо він буде перепливати озеро?
5. Чому окремі параметри руху тіла є відносними величинами? Назвіть їх.
6. Сформулюйте закон додавання швидкостей. Наведіть приклад, коли відносна швидкість за модулем дорівнюватиме переносній.



### Вправа 3

1. Яку швидкість повинен мати катер відносно води, щоб при швидкості течії річки, що дорівнює 2 м/с, він переміщувався перпендикулярно до берегів зі швидкістю 3,5 м/с?

2. Моторний човен долає відстань 20 км за течією річки за 2 год, а повертається назад за 2,5 год. Яка його швидкість відносно течії і яка швидкість течії річки?

3\*. Ескалатор метро піднімає пасажирів, який стоїть на ньому, за 1 хв. Нерухомим ескалатором пасажир піднімається за 3 хв. За який час він підніметься ескалатором, який рухається, якщо йтиме ним з такою самою швидкістю?

4\*. Пасажир, який їде потягом зі швидкістю 54 км/год, протягом 7 с бачить зустрічний потяг. Яка довжина зустрічного потяга, якщо його швидкість 36 км/год?

## § 8. Рівноприскорений рух. Прискорення

32

Під час рівномірного прямолінійного руху швидкість у різних точках траєкторії залишається незмінною. Проте в реальному житті ми частіше маємо справу з нерівномірним рухом, коли швидкість тіла може змінюватися як за своїм значенням, так і за напрямом. Якщо за будь-які рівні інтервали часу швидкість руху тіла змінюється однаково чи за напрямом, чи за значенням, то такий рух називається **рівноприскореним**.

Значення швидкості руху може змінюватися по-різному – дуже стрімко (рух кулі в рушниці, старт ракети, розбіг літака тощо) і порівняно повільно (початок руху потяга, гальмування автомобіля тощо). Так само необхідно враховувати, що швидкість як векторна величина може змінювати напрям, і така зміна також характеризує нерівномірність руху. У фізиці для оцінювання стрімкості зміни швидкості руху застосовують фізичну величину, яка називається **прискоренням**.



Для характеристики нерівномірного руху використовують поняття прискорення, яке визначає, наскільки стрімко змінюється швидкість руху.

*Прискорення – це векторна фізична величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості тіла до інтервалу часу, протягом якого така зміна відбулася:*

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \quad (1)$$

де  $\vec{v}_0$  – початкова швидкість тіла,  $\vec{v}$  – його кінцева швидкість,  $t$  – час, протягом якого ця зміна відбувалася.

З означення рівноприскореного руху випливає, що його прискорення є сталою величиною ( $\vec{a} = \text{const}$ ), оскільки за рівні інтервали часу швидкість змінюється однаково. У СІ прискорення



вимірюється в метрах за секунду у квадраті ( $\text{м/с}^2$ ).  $1 \text{ м/с}^2$  – це прискорення такого руху, під час якого тіло за 1 с змінює свою швидкість на  $1 \text{ м/с}$ .

Рівноприскорений рух може бути власне прискореним, коли швидкість тіла з часом зростає, і сповільненим, коли вона спадає. Значення прискорення руху визначають, враховуючи векторні властивості даної фізичної величини. Зокрема, в проекціях на вісь  $OX$  (мал. 1.24) матимемо вираз для прискорення:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \quad (2)$$

У випадку коли  $a_x > 0$ , оскільки швидкість руху збільшується, адже  $v_x - v_{0x} > 0$ , і вектор прискорення  $\vec{a}$  збігається з напрямом руху.

Якщо рух сповільнений, отже, швидкість тіла з часом зменшується ( $v_0 > v$ ), то вектор прискорення буде протилежний до напрямку руху (мал. 1.25). У такому разі відповідно до обраного напрямку координатної осі  $OX$  проекція прискорення буде від'ємною ( $a_x < 0$ ).

Проте слід пам'ятати, що знак проекції прискорення не визначає характер руху – сповільнений він чи прискорений, – а залежить від вибору системи відліку. У цьому легко переконатися, якщо розглянути випадок, коли обидва тіла рухаються рівноприскорено в протилежних напрямках. Тоді одне з тіл матиме додатну проекцію прискорення ( $a_{x1} > 0$ ), а друге – від'ємну ( $a_{x2} < 0$ ), хоча обидва вони рухаються однаково – рівноприскорено.

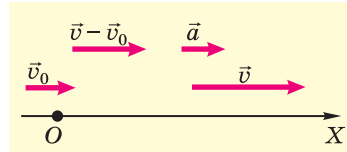
З формул (1) і (2) можна отримати кінематичне рівняння швидкості для рівноприскореного руху:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \quad (3)$$

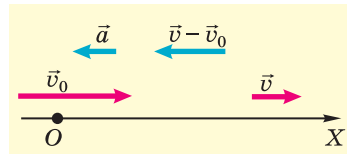
або в проекціях на обрану вісь  $OX$ :

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (4)$$

Виведемо тепер кінематичне рівняння переміщення для рівноприскореного руху. Врахуємо, що швидкість під час такого руху весь час змінюється, наприклад, на початку руху вона дорівнює  $v_0$ , а в кінці руху вона вже буде  $v$ . Тому у формулі переміщення можна скористатися поняттям середньої швидкості (відоме з 8-го класу):  $\vec{s} = \vec{v}_c t = \frac{\vec{v} + \vec{v}_0}{2} t$ . Підставивши в цю формулу рівняння (3) і зробивши певні перетворення, отримаємо:



Мал. 1.24. Визначення прискорення тіла



Мал. 1.25. Прискорення сповільненого руху

$$\bar{s} = \frac{\bar{v}_0 + \bar{a}t + \bar{v}_0}{2} t \Rightarrow \bar{s} = \bar{v}_0 t + \frac{\bar{a}t^2}{2} \quad (5)$$

або в проєкціях на обрану вісь  $OX$ :

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (6)$$

Якщо початкова швидкість тіла дорівнювала  $0$  ( $v_0 = 0$ ), то кінематичне рівняння переміщення набуває вигляду:

$$\bar{s} = \frac{\bar{a}t^2}{2} \quad (7)$$

або в проєкціях на обрану вісь  $OX$ :

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}. \quad (8)$$

Для прямолінійного руху, враховуючи, що  $s_x = x - x_0$ , одержимо кінематичне рівняння координат:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (9)$$

34 або для випадку, коли  $v_{0x} = 0$ :

$$x = x_0 + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (10)$$


Слід пам'ятати, що під час розв'язування задач необхідно враховувати знаки проєкцій у відповідних кінематичних рівняннях.

Досить часто для визначення проєкції переміщення використовують рівняння, в якому не потрібно знати час зміни швидкості. Щоб його вивести, підставимо в кінематичне рівняння

$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$  вираз для часу  $t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}$ . Зробивши певні математичні перетворення (пропонуємо вам зробити їх самостійно), одержимо формулу:

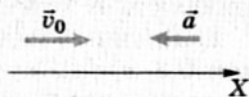
$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (11)$$

Звідси  $v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x s_x$ . Якщо  $v_{0x} = 0$ , то  $v_x = \sqrt{2a_x s_x}$ .

- 
1. Який рух називається рівноприскореним? Наведіть приклади.
  2. Що таке прискорення? Чи змінюється прискорення під час рівноприскореного руху?
  3. Що означає прискорення  $5 \text{ м/с}^2$ ?
  4. У якому випадку проєкція прискорення має додатне, а в якому від'ємне значення?
  5. Що таке кінематичне рівняння рівноприскореного руху? Чим воно відрізняється від рівняння переміщення?
  6. Чи можна знайти прискорення, не знаючи часу руху?

## § 9. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Водій починає гальмувати в той час, коли спідометр автомобіля фіксує швидкість 72 км/год. Через який час зупиниться автомобіль, якщо він рухався з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ ? Який був у нього гальмівний шлях?



Дано:

$$v_0 = 72 \text{ км/год} = 20 \text{ м/с}, \\ a = 2 \text{ м/с}^2, \\ v = 0.$$

$$t - ? \\ l - ?$$

Розв'язання

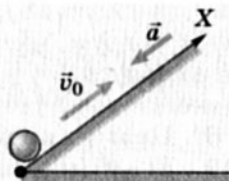
За умовою спідометр показує початкову швидкість автомобіля  $v_0$ . Рух автомобіля під час гальмування – сповільнений, тому вектор прискорення напрямлений у протилежний бік до напрямку руху. Кінцева швидкість  $v = 0$  (автомобіль зупинився).

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \quad v_x = v = 0, \quad v_{0x} > 0, \quad a_x < 0; \\ \text{отже, } 0 = v_0 - at, \text{ звідси}$$

$$t = \frac{v_0}{a}, \quad t = \frac{20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 10 \text{ с}, \quad l = |s_x| = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x} = 100 \text{ м}.$$

**Відповідь:** автомобіль зупиниться через 10 с, пройшовши 100 м.

**Задача 2.** Кульку штовхнули по похилому жолобу вгору зі швидкістю 6 м/с. Кулька рухається з прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Визначити швидкість кульки через 8 с та 16 с після початку руху.



Дано:

$$v_0 = 6 \text{ м/с}, \\ a = 0,5 \text{ м/с}^2, \\ t_1 = 8 \text{ с}, \\ t_2 = 14 \text{ с}.$$

$$v_1 - ? \\ v_2 - ?$$

Розв'язання

Спрямуємо вісь  $OX$  уздовж жолоба (див. мал.).

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

Ураховуючи знаки проекцій швидкості і прискорення, маємо  $v_x = v_0 - at$ .

Звідси рівняння для  $t_1$  набуває такого вигляду:

$$v_1 = v_0 - at_1, \quad v_1 = 6 \text{ м/с} - 0,5 \text{ м/с}^2 \cdot 8 \text{ с} = 2 \text{ м/с}. \text{ Для } t_2 \text{ маємо:}$$

$$v_2 = v_0 - at_2, \quad v_2 = 6 \text{ м/с} - 0,5 \text{ м/с}^2 \cdot 14 \text{ с} = -1 \text{ м/с}.$$

Аналізуючи одержані результати, можна зробити висновок, що в першому випадку кулька рухається вгору ( $v_1 > 0$ ), а в другому випадку котиться вниз, оскільки  $v_2 < 0$ .

**Відповідь:**  $v_1 = 2 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = -1 \text{ м/с}$ .

## Вправа 4

1. З яким прискоренням рухається автомобіль, якщо його швидкість за 1 хв змінилася з 9 км/год до 54 км/год?

2. Лижник з'їжджає з гори за 15 с, рухаючись із прискоренням  $0,8 \text{ м/с}^2$ . Яку швидкість він матиме наприкінці спуску, якщо вважати його рух рівноприскореним?

3. Під час гальмування швидкість потяга змінилася з 36 км/год до 9 км/год за 15 с. Чому дорівнює прискорення потяга? Через який час від початку гальмування він зупиниться? Який шлях при цьому пройде?

4. Під час рівноприскореного прямолінійного руху велосипедист досягає швидкості 27 км/год за 25 с, рухаючись із прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Яка була його початкова швидкість?

5. З яким прискоренням рухався автомобіль під час аварійного гальмування, якщо його швидкість перед гальмуванням була 72 км/год, а гальмівний шлях дорівнював 20 м? Скільки часу минуло до його повної зупинки?

36

6\*. Тіло, рухаючись рівноприскорено без початкової швидкості, за восьму секунду руху пройшло 30 м. Знайти його переміщення за десяту секунду руху.

7. Перебуваючи на відстані 200 м один від іншого, два велосипедисти починають одночасно їхати назустріч один одному: один піднімається вгору з прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$ , маючи початкову швидкість 18 км/год, другий спускається з гори з тим самим прискоренням, маючи початкову швидкість 5,4 м/с. Через який час вони зустрінуться і яке переміщення здійснить кожен з них до моменту зустрічі?

8\*. Прямолінійний рух тіла описується рівнянням руху  $x = 10 - 8t + t^2$  (м). Знайти прискорення тіла. Написати рівняння швидкості даного руху. Яке переміщення здійснить тіло за перші 2 с руху? Через який час від початку руху тіла його координата дорівнюватиме нулю?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Визначення прискорення тіла  
під час рівноприскореного руху

**М е т а.** Визначити прискорення тіла, яке рухається рівноприскорено.

**Обладнання:** набір кульок однакового розміру, виготовлених з різних матеріалів (стальна, дерев'яна, пластмасова тощо), жолоб, секундомір, лінійка або мірна стрічка, штатив з муфтою і затискачем, циліндр.

### Вказівки до роботи

Кулька, що скочується жолобом, рухається рівноприскорено, оскільки її швидкість увесь час рівномірно збільшується. Якщо її пускати жолобом уздовж осі  $OX$  без початкової швидкості, то її

рух описується рівнянням  $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$ . Звідси  $a_x = \frac{2s_x}{t^2}$ .

Оскільки кулька скочується жолобом досить швидко, важко зафіксувати пройдений шлях за малий інтервал часу. Тому роблять кілька спроб пуску кульки жолобом (як правило, не менше п'яти) і знаходять середнє значення часу її руху до удару по циліндру.

### Виконання роботи

1. Установити жолоб за допомогою штатива під невеликим кутом нахилу. У кінці жолоба покласти циліндр і виміряти довжину ділянки жолоба від циліндра до точки пуску кульки.

2. Пустити жолобом одну з кульок, наприклад сталю, одночасно увімкнувши секундомір, і вимкнути його в момент дотику кульки до циліндра.

3. Зробити кілька спроб і знайти середнє арифметичне значення часу руху кульки жолобом:  $t_c = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n}$ .

4. Результати проведених дослідів записати в таблицю.

Таблиця

№	$s$ , м	$t_c$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>
1			
2			
3			
4			
5			

5. За допомогою формули знайти прискорення кульки для даного переміщення.

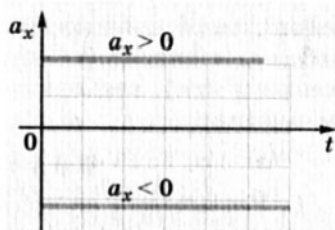
6. Повторити дослід з іншими кульками, які мають різні маси, оскільки виготовлені з різних матеріалів. Визначити їхні прискорення для того самого кута нахилу.

7. Змінити кут нахилу жолоба і повторити досліди. Результати записати в таблицю і знайти прискорення кульок для цього кута нахилу.

8. Порівняти одержані значення прискорення для різних випадків і зробити висновок.

## § 10. Графіки рівноприскореного руху

1. **Графік прискорення  $a = a(t)$ .** Як відомо, під час рівноприскореного руху прискорення є величиною сталою ( $a = \text{const}$ ). Тому залежність проекції прискорення від часу відображає пряма, паралельна осі часу  $t$ . Залежно від значення проекції прискорення – додатна вона чи від'ємна – ця пряма розташована над віссю чи під нею (мал. 1.26).



Мал. 1.26. Графік прискорення

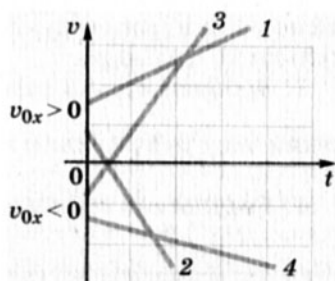
2. **Графік швидкості  $v = v(t)$ .** Лінійна залежність швидкості від часу зумовлена математичним видом її кінематичного рівняння  $v_x = v_{0x} + a_x t$ . Залежно від значень проекцій прискорення  $a_x$  і початкової швидкості  $v_{0x}$  графік матиме різний вигляд (мал. 1.27), зокрема:

$$1 - v_{0x} > 0, a_x > 0;$$

$$2 - v_{0x} > 0, a_x < 0;$$

$$3 - v_{0x} < 0, a_x > 0;$$

$$4 - v_{0x} < 0, a_x < 0.$$



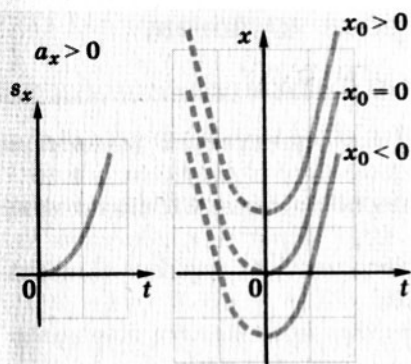
Мал. 1.27. Графік швидкості

Якщо  $v_{0x} = 0$ , то графік виходить з початку координат і залежно від значення проекції прискорення буде або здійматися вгору ( $a_x > 0$ ), або спадати вниз ( $a_x < 0$ ). Нахил прямих залежить від значення проекції прискорення: чим більше прискорення, тим крутіше здіймається чи спадає графік.

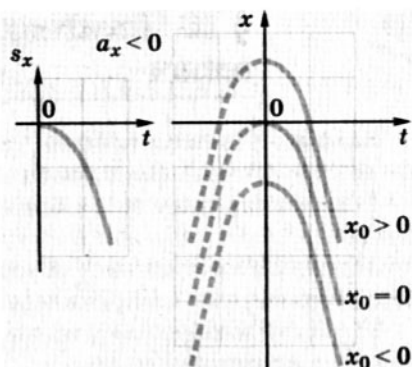
3. **Графік проекції переміщення  $s_x = s_x(t)$  і координати  $x = x(t)$ .**

Кінематичні рівняння переміщення і координати є квадратними рівняннями виду  $y = ax^2 + bx + c$ . Тому графіками залежності проекції переміщення і координати від часу є параболи, гілки яких залежно від параметрів руху мають різний вигляд. Наприклад, якщо  $v_{0x} = 0$  і  $a_x > 0$ , то графіки мають вигляд, зображений на малюнку 1.28. У графіку залежності координати від часу, якщо  $x_0 \neq 0$ , вершина параболи зміщується по осі ординат вгору або вниз залежно від значення  $x_0$ .

Якщо  $v_{0x} = 0$  і  $a_x < 0$ , то гілки параболи зорієнтовані вниз (мал. 1.29) і зміщення вершини параболи вгору або вниз по осі ординат так само залежить від значення  $x_0$ .



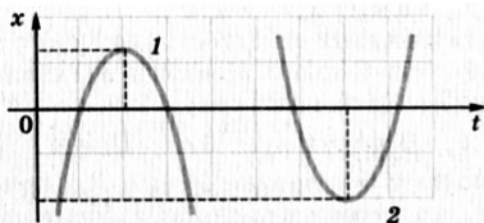
Мал. 1.28. Графіки проекції переміщення і координати ( $v_{0x} = 0, a_x > 0$ )



Мал. 1.29. Графіки проекції переміщення і координати ( $v_{0x} = 0, a_x < 0$ )

Якщо  $v_{0x} \neq 0$  і  $x_0 \neq 0$  (мал. 1.30), то вершина параболи зміщується в точку, координати якої визначають співвідношення:

$$x = x_0 - \frac{v_{0x}^2}{2a_x}, \quad t = -\frac{v_{0x}}{a_x}.$$



Мал. 1.30. Графік рівноприскореного руху ( $v_{0x} \neq 0$ )

Подані графіки відтворюють такі параметри рівноприскореного руху:

- 1)  $v_{0x} > 0; a_x < 0;$
- 2)  $v_{0x} < 0; a_x > 0.$

1. Який вигляд має графік прискорення для рівноприскореного руху?
2. У яких випадках графік швидкості рівноприскореного руху здійснюється вгору, а в яких він спадає вниз? Коли графік швидкості починається в початку координат?
3. Графік швидкості рівноприскореного руху перетинає вісь часу. Що це означає?
4. Яку форму має графік проекції переміщення? Коли його гілки «дивляться» вниз, а коли – вгору? У якому випадку графік проекції переміщення починається в початку координат?



## § 11. Приклади розв'язування задач

**Задача.** Прямолінійний рух тіла описується рівнянням  $x = 4 + 6t - 4t^2$  (м). Визначити:

- 1) характер руху тіла і його швидкість через 3 с від початку руху;
- 2) у який момент часу після початку його відліку тіло змінює напрям руху на протилежний;
- 3) у який момент часу після початку його відліку тіло повернеться в початкову точку;
- 4) переміщення та пройдений шлях через 2 с.

### Розв'язання

1) Для визначення швидкості тіла в будь-який момент часу потрібно скласти рівняння швидкості  $v_x = v_{0x} + a_x t$ . Порівняв-

40

ши загальне рівняння рівноприскороного руху  $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$

з рівнянням умови задачі  $x = 4 + 6t - 4t^2$ , знайдемо параметри руху:  $x_0 = 4$  м,  $v_{0x} = 6$  м/с,  $a_x = -8$  м/с<sup>2</sup>.

За таких умов рівняння швидкості для даного руху набуває вигляду:  $v_x = 6 - 8t$ . З цього рівняння визначимо проекцію швидкості через 3 с від початку руху:

$$v_x = 6 \text{ м/с} - 8 \text{ м/с}^2 \cdot 3 \text{ с} = -18 \text{ м/с}.$$

Отже, швидкість тіла дорівнює 18 м/с. Від'ємне її значення свідчить про те, що напрям швидкості протилежний обраному напрямку координатної осі. Тіло рухається сповільнено ( $a_x < 0$ ), тому в певний момент воно зупиниться ( $v_x = 0$ ) і може змінити напрям руху.

2) Для визначення моменту зміни напрямку руху потрібно рівняння швидкості прирівняти до 0 і розв'язати його відносно  $t$ :

$$0 = 6 - 8t, 8t = 6, t = 0,75 \text{ с}.$$

3) Тіло повернеться в початкову точку, коли його координата буде дорівнювати початковій координаті, тобто  $x = x_0 = 4$  м. Підставивши це значення в рівняння руху і розв'язавши його відносно  $t$ , одержимо:

$$4 = 4 + 6t - 4t^2, 6t - 4t^2 = 0, t(6 - 4t) = 0;$$

$$t_1 = 0, t_2 = 1,5 \text{ с}.$$

Отже, тіло мало початкову координату на початку руху ( $t_1 = 0$ ) і через 1,5 с після початку руху.



4) Для визначення переміщення через 2 с від початку руху складемо рівняння проекції переміщення  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$  за параметрами даного руху:  $s_x = 6t - 4t^2$ . Звідси  $s_x = 12 \text{ м} - 16 \text{ м} = -4 \text{ м}$ .

Для визначення шляху необхідно врахувати, що тіло змінювало напрям руху, тому  $l = |s_1| + |s_2|$ , де  $s_1$  і  $s_2$  – переміщення тіла до і після зміни напрямку руху. З розв'язку задачі знайшли, що час руху до зміни напрямку дорівнює 0,75 с, після зміни напрямку руху  $t = 2 \text{ с} - 0,75 \text{ с} = 1,25 \text{ с}$ . Отже,

$$s_1 = 6 \text{ м/с} \cdot 0,75 \text{ с} - 4 \text{ м/с}^2 \cdot 0,5625 \text{ с}^2 = 2,25 \text{ м};$$

$$s_2 = 4t_2^2, \quad s_2 = 4 \text{ м/с}^2 \cdot 1,5625 \text{ с}^2 = 6,25 \text{ м}.$$

Таким чином, пройдений шлях дорівнює:

$$l = 2,25 \text{ м} + 6,25 \text{ м} = 8,5 \text{ м}.$$

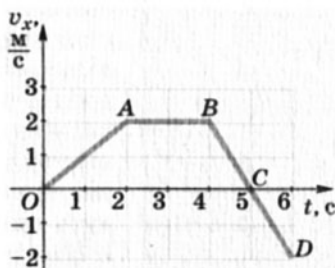
### Вправа 5

1\*. На малюнку 1.31 зображено графік швидкості руху тіла. Схарактеризувати його ділянки і записати рівняння руху для кожної з них. Побудувати графік прискорення  $a = a(t)$ . Знайти переміщення тіла за 3 с і за весь час руху. Визначити середню швидкість переміщення тіла за 4 с і за весь час руху. Які початкові і кінцеві швидкості мало тіло на кожній ділянці руху?

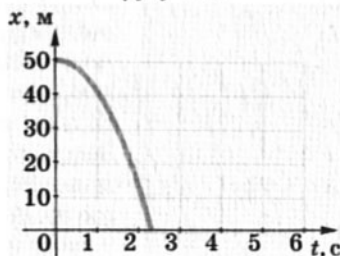
2. Кабіна ліфта спочатку рівноприскорено піднімається вгору протягом 4 с, досягаючи швидкості 4 м/с. Далі вона рухається рівномірно протягом 8 с, а останні 3 с сповільнює хід до остаточної зупинки. Побудувати графіки швидкості  $v = v(t)$  і прискорення  $a = a(t)$ . Визначити переміщення ліфта за весь час руху.

3\*. На малюнку 1.32 зображено графік рівноприскореного руху. Побудувати на його основі графіки швидкості  $v = v(t)$  і прискорення  $a = a(t)$ .

4. Побудувати графік швидкості для тіла, яке спочатку протягом 3 с рухається сповільнено з прискорен-



Мал. 1.31. Графік швидкості руху тіла



Мал. 1.32. Графік рівноприскореного руху

ням  $-2 \text{ м/с}^2$ , маючи початкову швидкість  $4 \text{ м/с}$ , потім протягом  $2 \text{ с}$  рухається рівномірно і далі прискорюється протягом  $2 \text{ с}$  до швидкості  $2 \text{ м/с}$ .

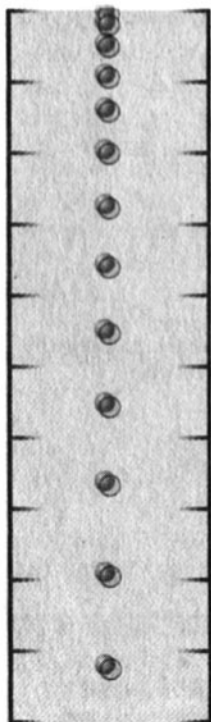
## § 12. Вільне падіння тіл. Прискорення вільного падіння

Численні спостереження і досліди переконують нас у тому, що всі тіла падають на землю внаслідок дії сили тяжіння. Якщо тіло кинути вертикально вгору, воно все одно з часом впаде на землю: спочатку його швидкість зменшуватиметься, а згодом воно почне рухатись униз зі зростаючою швидкістю.

Аналіз характеру руху тіла, що падає (мал. 1.33), показує, що цей рух рівноприскорений, тобто за рівні інтервали часу тіло проходить різні відстані, причому вони весь час пропорційно збільшуються.

42

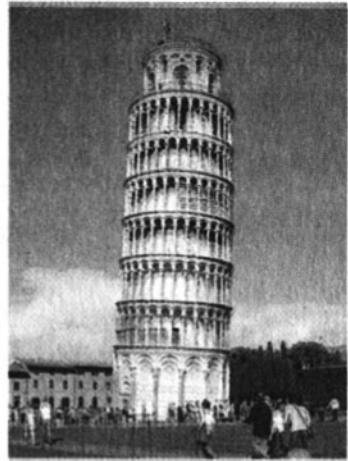
Тривалий час вважали, що різним тілам Земля надає різного прискорення і тому вони падають на неї неоднаково – одні швидше, інші повільніше. У цьому переконував і життєвий досвід: легка пір'їнка, що падає в повітрі з однакової висоти



разом із свинцевою кулькою, досягає землі пізніше, ніж кулька. Цей, на перший погляд, очевидний факт змушував багатьох людей спотворено уявляти справжній перебіг явища **вільного падіння тіл**. Якщо повторити цей дослід в умовах, коли на тіла не діють інші чинники, крім земного тяжіння, наприклад у циліндричній посудині, з якої видалено повітря, то результат буде іншим: обидва тіла впадуть одночасно. Цей дослід уперше виконав І. Ньютон і переконався, що в умовах вільного падіння, тобто під дією лише сили тяжіння, всі тіла, незалежно від їхньої маси і форми, падають однаково. Отже, *вільне падіння – це рівноприскорений рух тіл під дією сили тяжіння без інших сторонніх впливів на них (опір повітря, електромагнітна взаємодія тощо)*. Вільне падіння тіл відбувається не лише на Землі внаслідок притягання нею всіх тіл, а притаманне й іншим планетам, Сонцю, Місяцю тощо. Проте прискорення вільного падіння у них, звичайно ж, різне.

Мал. 1.33. Вільне падіння тіла ( $v_0 = 0$ )

Видатний італійський фізик Галілео Галілей, вивчаючи рух тіл похилим жолобом, установив, що кулі однакового діаметра, виготовлені з деревини, заліза, слонової кістки тощо, мають однакове прискорення, яке не залежить від маси куль. Збільшуючи кут нахилу, він дійшов висновку, що значення прискорення при цьому збільшується, але залишається однаковим для всіх тіл, незалежно від їх маси. Він зазначив: якщо збільшувати кут нахилу жолоба до  $90^\circ$ , тобто до вертикального його положення, висновки щодо прискорення тіл не зміняться, оскільки не з'являються

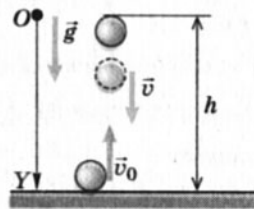


Мал. 1.34. Пізанська вежа

ся додаткові чинники, які вплинули б на характер руху тіл. Для підтвердження цього висновку вчений провів свій відомий дослід з гарматним ядром і мушкетною кулею, кидаючи їх з похилої Пізанської вежі (мал. 1.34): обидва тіла досягали землі одночасно. Таким чином Г. Галілей експериментально встановив, що *прискорення вільного падіння не залежить від маси тіл і є сталою величиною для кожної планети.*

Завдяки численним вимірюванням прискорення вільного падіння визначено його середнє значення біля поверхні Землі:  $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ . Встановлено, що воно залежить від географічної широти місцевості. Так, на екваторі  $g = 9,78 \text{ м/с}^2$ , а на полюсах  $g = 9,83 \text{ м/с}^2$ .

Оскільки вільне падіння і рух тіла, кинутого вертикально вгору (як частковий випадок вільного падіння), є рівноприскореними рухами, усі кінематичні рівняння такого руху справедливі і для даного випадку. Разом з тим особливості його як вертикально спрямованого руху потребують врахування цього у відповідних рівняннях. Оберемо вісь  $OY$  для виведення кінематичних рівнянь у разі вільного падіння тіла (мал. 1.35).



Мал. 1.35. Вільне падіння тіла

Враховуючи знаки проєкцій векторних величин на вісь  $OY$ , а також те, що проєкцію вертикального переміщення (висоту) позначають літерою  $h$ , маємо:

Кінематичні рівняння руху	Вільне падіння тіла з висоти $h$	Рух тіла вертикально вгору
$v_y = v_{0y} + a_y t$	$v = v_0 + gt$	$v = v_0 - gt$
$s_y = v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}$	$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$
$s_y = \frac{a_y t^2}{2}, v_{0y} = 0$	Час падіння $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ , якщо $v_0 = 0$	Час підйому $t = \frac{v_0}{g}$
$s_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2a_y}$	Швидкість під час падіння $v = \sqrt{2gh}$	Висота підйому $h = \frac{v_0^2}{2g}$

1. Що таке вільне падіння тіл? Наведіть приклади.
2. Який це вид руху? Чому?
3. У чому полягає суть досліду Г. Галілея?
4. Як можна довести, що прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла?
5. Час підйому вертикально кинутого тіла до найвищої точки становить 2 с. Скільки часу воно падатиме?

### § 13. Приклади розв'язування задач

**Задача.** Тіло кидають вертикально вгору з початковою швидкістю 30 м/с (мал. 1.36).

1. Через який час воно буде на висоті 40 м?

Скористаємося рівнянням руху

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

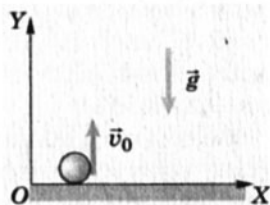
З урахуванням того, що для спрощення рівняння можна прийняти  $g \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , одержимо

$$40 = 30t - \frac{gt^2}{2}, 5t^2 - 30t + 40 = 0, t^2 - 6t + 8 = 0.$$

Розв'язавши квадратне рівняння, отримуємо два корені

$$t_1 = 2 \text{ с}, t_2 = 4 \text{ с}.$$

Обидва корені задовольняють зміст задачі. Адже тіло було на висоті 40 м двічі: через 2 с, рухаючись угору, і через 4 с – падаючи вниз.



Мал. 1.36. Рух тіла, кинутого вертикально вгору

2. Яку швидкість матиме тіло, пролітаючи відмітку 40 м?

$$v_y = v_{y0} - g_y t, \quad v_y = 30 - 10t;$$

$$v_{y1} = v_0 - g t_1, \quad v_{y1} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 2 \text{ с} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{y2} = v_0 - g t_2, \quad v_{y2} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4 \text{ с} = -10 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

На одній і тій самій висоті швидкість тіла за модулем однакова, а за напрямом – протилежна.

3. На яку висоту над поверхнею землі підніметься тіло?

У найвищій точці траєкторії швидкість тіла дорівнює 0.

Отже,

$$h = \frac{v_0^2}{2g}, \quad h = 45 \text{ м}.$$

Зрозуміло, що весь час руху становить 6 с, загальне переміщення тіла дорівнює 0, а пройдений шлях  $l = 90 \text{ м}$ .

### Вправа 6

45

1. Яка глибина сухого колодязя, якщо камінь падає в нього 2,5 с? Яку швидкість він матиме перед досягненням дна?

2. М'яч кинули вертикально вгору зі швидкістю 10 м/с. Яку швидкість він матиме через 1,5 с? Чому дорівнюватиме пройдений шлях і переміщення за цей час? Якої максимальної висоти він досягне? В який момент часу він буде на висоті 5 м?

3. Тіло, що вільно падає, проходить останню третину свого шляху за 1,1 с. Знайти висоту і час падіння.

4. Дві кульки кинули вертикально вгору з інтервалом в 1 с. Початкова швидкість першої кульки 8 м/с, другої – 5 м/с. На якій висоті вони зустрінуться?

5\*. Два тіла, що вільно падають з різної висоти, досягають землі одночасно. Перше тіло падало 2 с, друге – 3 с. На якій висоті знаходилося друге тіло, коли почало падати перше?

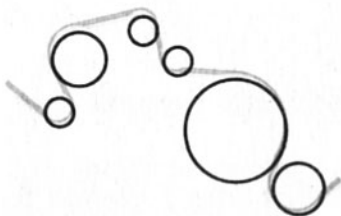
6. На Місяці прискорення вільного падіння приблизно у 6 разів менше, ніж на Землі. У скільки разів відрізнятиметься час падіння тіла з однакової висоти на Місяці і на Землі?

7. Кулька вільно падає з висоти 4,9 м. За який час вона пролітає останній метр свого шляху?

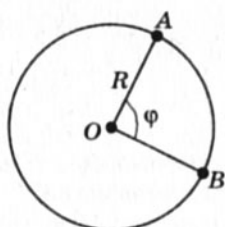
## § 14. Рух точки по колу

До цього часу ми розглядали нерівномірний (рівноприскорений) рух, траєкторією якого була пряма. У такому русі змінювалось значення швидкості, а її напрям, як правило, залишався без змін. Насправді в житті частіше трапляються

криволінійні рухи (орбітальний рух планет, повороти транспорту на дорозі, атракціон «Американські гірки», каруселі тощо), під час яких зазнає змін напрям швидкості руху, виявляючи векторний характер прискорення.



Мал. 1.37. Криволінійний рух



Мал. 1.38. Рух по колу

За формою траєкторії криволінійні рухи досить різноманітні. Проте всі вони можуть бути представлені як послідовність ділянок, які складаються з відрізків прямих і дуг кіл різного діаметра (мал. 1.37). Тобто будь-який криволінійний рух можна подати як комбінацію прямолінійного руху і руху тіла по колу.

Розглянемо найпростіший випадок – рівномірний рух матеріальної точки по колу. Нехай матеріальна точка рівномірно рухається по колу радіуса  $R$  і за певний час  $t$  переміщується з точки  $A$  в точку  $B$  (мал. 1.38). Кут, який при цьому описує радіус, називається **кутовим переміщенням**.

Кутове переміщення позначають грецькою літерою  $\varphi$  («фі») і в СІ вимірюють в радіанах (рад). *1 рад дорівнює центральному куту між двома радіусами, які обмежують дугу, довжина якої дорівнює радіусу.* Отже, за один оберт ( $360^\circ$ ) матеріальна точка здійснює кутове переміщення  $2\pi$  рад.

Рух тіла по колу характеризують також **період обертання** і **обертова частота**. *Період обертання – це час, протягом якого тіло робить повний оберт по колу, тобто поворот на кут  $2\pi$  рад:*

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

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

У СІ період обертання  $T$  вимірюють в секундах (с).

*Обертова частота  $n$  характеризує кількість обертів тіла або матеріальної точки навколо центра обертання за 1 секунду:*

$$n = \frac{N}{t}, \quad (2)$$

де  $N$  – кількість обертів, зроблених за час  $t$ .

У СІ обертова частота вимірюється в обертах за секунду (об/с).

Між обертовою частотою і періодом обертання існує взаємно обернена залежність:  $T = \frac{1}{n}$  та  $n = \frac{1}{T}$ .

Для визначення стрімкості руху точки по колу вводять поняття **кутової швидкості**. Це фізична величина, яка дорівнює відношенню кутового переміщення  $\varphi$  до часу  $t$ , протягом якого це переміщення відбувалося:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \quad (3)$$

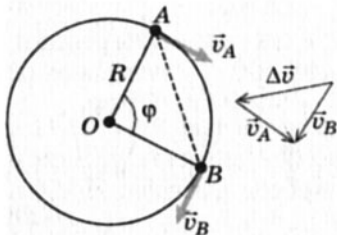
У СІ кутова швидкість вимірюється в радіанах за секунду (рад/с). 1 рад/с дорівнює кутовій швидкості такого рівномірного руху по колу, при якому за 1 секунду здійснюється кутове переміщення 1 радіан.

Оскільки за період  $T$  кутове переміщення  $\varphi$  дорівнює  $2\pi$  рад, то кутова швидкість може бути визначена через період обертання і обертову частоту:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega = 2\pi n. \quad (4)$$

Рівномірний рух тіла по колу як складова криволінійного руху характеризується специфічними кінематичними величинами, які дають змогу відповідним чином його описати. Це – кутове переміщення і кутова швидкість, період обертання й обертова частота. Разом з тим при цьому застосовують і звичне для нас поняття швидкості, яке в цьому разі називають **лінійною швидкістю**.

Під час рівномірного руху тіла по колу його лінійна швидкість за модулем залишається незмінною ( $v_A = v_B = v = \text{const}$ ), проте її напрям весь час змінюється (мал. 1.39). Тому лінійну швидкість доцільно представляти як швидкість тіла в певній точці. Вона напрямлена по дотичній до дуги в даній точці (точка  $A$  і точка  $B$ ). У цьому можна переконатися, приклавши до точильного каменя сталевий ніж: іскри від нього вилітатимуть по дотичній до поверхні каменя у місці прикладання ножа.



Мал. 1.39. Зміна напрямку лінійної швидкості

**Лінійна швидкість тіла, що рівномірно обертається по колу, весь час змінюється за напрямом і в будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до дуги цього кола.**

Оскільки за модулем вона не змінюється, то з формули швидкості рівномірного руху  $v = \frac{l}{t}$  можна знайти вираз для лінійної швидкості:  $v = \frac{2\pi R}{T}$ . Або враховуючи, що  $T = \frac{1}{n}$ , отримаємо:  $v = 2\pi Rn$ .

Порівнюючи формули лінійної швидкості  $v = 2\pi Rn$  з кутовою  $\omega = 2\pi l$ , шляхом нескладних перетворень отримаємо:

$$v = \omega R, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{v}{R}. \quad (6)$$



Як зазначалося вище (див. § 8), зміна напрямку векторної швидкості також викликає прискорення, адже як векторна величина воно дорівнює  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t}$ . Тому навіть під час

рівномірного руху точки по колу виникає прискорення внаслідок зміни напрямку лінійної швидкості. Його називають *доцентровим*, оскільки як вектор воно спрямоване до центра кола, по якому рухається точка (матеріальна точка). Значення

доцентрового прискорення визначають за формулою  $a_d = \frac{v^2}{R}$ ,

або, взявши до уваги, що  $v = \omega R$ , одержимо  $a_d = \omega^2 R$ .

48

**Задача 1.** Земля робить один оберт навколо своєї осі за 24 год. Обчислити кутову і лінійну швидкості обертання точок поверхні Землі, розміщених на екваторі. Радіус Землі дорівнює 6400 км. Вважати, що вісь обертання проходить крізь полюси.

Дано:

$$T = 24 \text{ год} =$$

$$= 86\,400 \text{ с,}$$

$$R = 6400 \text{ км.}$$

$$\omega = ?$$

$$v = ?$$

Розв'язання

Обертання Землі навколо своєї осі можна вважати рівномірним.

Отже,

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

$$\omega = \frac{6,28 \text{ рад}}{86\,400 \text{ с}} = 0,000073 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 7,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$v = \omega R;$$

$$v = 7,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} = 47 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Відповідь:**  $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ ,  $v = 47 \text{ м/с}$ .

**Задача 2.** Велосипедист їде по дорозі зі швидкістю 10 м/с. Скільки обертів за секунду роблять колеса велосипеда, якщо вони не ковзають? Яке доцентрове прискорення мають точки на ободі колеса, якщо його радіус 35 см?



Дано:

$$v = 10 \text{ м/с}, \\ R = 0,35 \text{ м}.$$

 $n - ? \quad a - ?$ 

Розв'язання

$$v = 2\pi nR; n = \frac{2\pi R}{v}; n = \frac{6,28 \cdot 0,35 \text{ м}}{10 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 0,22 \frac{\text{об}}{\text{с}};$$

$$a = \frac{v^2}{R}; a = \frac{100 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{0,35 \text{ м}} = 285 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

**Відповідь:**  $n = 0,22 \text{ об/с}$ ,  $a = 285 \text{ м/с}^2$ .

1. У яких випадках рух тіла вважається нерівномірним? Наведіть приклади.
2. Чому будь-яку криволінійну траєкторію можна частково представити рухом по колу?
3. Що таке кутове переміщення? Чому воно дорівнює у годинникової стрілки за 3 год? За 6 год? За добу?
4. Чому дорівнює період обертання секундної стрілки? Хвилинової стрілки? Годинної стрілки?
5. Що таке обертова частота? Чому дорівнює обертова частота Землі навколо Сонця?
6. Що таке кутова швидкість? У яких одиницях вона вимірюється?
7. Чому дорівнює кутова швидкість секундної стрілки?
8. Чому точки, що рівномірно рухаються по колу, мають доцентрове прискорення?

## Вправа 7

1. Щоб шліфувальний круг діаметром 30 см не зруйнувався, лінійна швидкість точок на його поверхні не повинна перевищувати 95 м/с. Визначити максимально допустиму обертову частоту шліфувального круга.

2. Колесо велосипеда має діаметр 0,5 м. Яку обертову частоту повинно мати колесо, щоб велосипедист їхав зі швидкістю 5 м/с? Яку швидкість при цьому матиме відносно землі нижня точка велосипедного колеса, його вісь і верхня точка?

3. Діаметр великої шестірні велосипеда дорівнює 30 см, вона зв'язана ланцюговою передачею з малою шестірнею діаметром 10 см, яка жорстко з'єднана з колесом велосипеда. Діаметр колеса дорівнює 80 см. З якою частотою має обертати педаль велосипедист, щоб рухатися дорогою зі швидкістю 36 км/год?

4. Період обертання космічного корабля навколо Землі становить 90 хв. Середня висота його над поверхнею Землі дорівнює 320 км, радіус Землі – 6400 км. Яка лінійна швидкість космічного корабля?

## Головне в розділі 1

Кінематика вивчає механічний рух тіл, не розглядаючи причин, що його викликали. Опис механічного руху в кінематиці ґрунтується на з'ясуванні характеру змін із часом координат, переміщень, швидкостей. Щоб описати рух тіла, треба встановити закон (рівняння) зміни в часі координат чи швидкостей тіла відносно інших тіл. Зміна положення тіла в просторі з плином часу характеризується переміщенням. Це векторна величина, яка визначає не лише зміну положення тіла, а й напрям, у якому відбувався рух.

Механічний рух за формою траєкторії може бути прямолінійним чи криволінійним, за характером руху – рівномірним чи нерівномірним, зокрема рівноприскореним. Залежно від цього рівняння руху мають такий вигляд:

*для рівномірного прямолінійного руху*

$$\vec{s} = \vec{v}t \text{ або } x = x_0 + v_x t;$$

50

*для рівноприскореного прямолінійного руху*

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \text{ або } v_x = v_{0x} + a_x t;$$

*для рівномірного руху по колу*  $\varphi = \omega t, v = \omega R$ .

Механічний рух є відносним. Це означає, що такі його параметри, як траєкторія, переміщення, пройдений шлях, швидкість, залежать від вибору системи відліку. Механічний рух відносно різних систем відліку може бути представлений двома незалежними рухами – відносним рухом тіла в рухомій системі відліку і переносним рухом рухомої системи відліку відносно нерухомої. Це твердження відтворює закон додавання швидкостей – швидкість тіла в нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі відносної і переносної швидкостей:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{відн}} + \vec{v}_{\text{пер}}.$$

Рівноприскорений рух характеризує векторна фізична величина, що називається прискоренням:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ . Одним з випадків рівноприскореного руху є вільне падіння, коли рух тіла відбувається лише під дією сили тяжіння внаслідок притягання всіх тіл Землею, без інших сторонніх впливів на них (опір повітря, електромагнітна взаємодія тощо). Прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла і є сталою величиною для даної місцевості. Біля поверхні Землі воно приблизно дорівнює  $9,81 \text{ м/с}^2$ . Рівняння руху тіл під час вільного падіння залежать від вибору системи відліку:

Тіло падає з висоти $h$ :	Тіло кинуте вертикально вгору:
$v = v_0 + gt$	$v = v_0 - gt$
$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$
Час падіння $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ , якщо $v_0 = 0$	Час підйому $t = \frac{v_0}{g}$
Швидкість під час падіння $v = \sqrt{2gh}$	Висота підйому $h = \frac{v_0^2}{2g}$

Криволінійний рух можна представити як послідовність ділянок, що складаються з відрізків прямих і дуг кіл різного діаметра. Рівномірний рух тіла по колу характеризується кутовим переміщенням і кутовою швидкістю:

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

Між лінійною і кутовою швидкостями існує співвідношення:

$$v = \omega R.$$

Під час рівномірного руху точки по колу виникає доцентрове прискорення:

$$a_d = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

## Розділ 2



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

- закони механіки Ньютона та межі їх застосування;
- закон всесвітнього тяжіння;
- фізичні величини, що характеризують механічну взаємодію тіл (різні види сили, вага тіла, момент сили, імпульс тіла, механічна енергія, робота і потужність);
- умову рівноваги тіла, що має вісь обертання;
- закон збереження імпульсу, закон збереження механічної енергії;
- основні етапи розвитку космонавтики.

Ви зможете **пояснити**:

- гравітаційну взаємодію тіл, явище невагомості;
- реактивний рух і рух тіла під дією кількох сил;
- рух штучних супутників Землі;
- фізичну природу прояву різних сил у механіці.

Ви будете **здатні**:

- наводити приклади застосування законів динаміки;
- розрізняти кінематичні рівняння руху і рівняння руху в динаміці;
- розв'язувати задачі, застосовуючи закони Ньютона, всесвітнього тяжіння, збереження імпульсу, механічної енергії, умову рівноваги тіл, що мають вісь обертання;
- користуватися динамометром та іншими приладами, дотримуючись правил їх експлуатації;
- досліджувати механічну взаємодію тіл, їх рівновагу під дією кількох сил;
- визначати похибки вимірювань у процесі дослідження механічного руху і взаємодії тіл.



# ДИНАМІКА

53

Основна задача механіки – опис руху матеріальних тіл, тобто встановлення закону (рівняння) їх руху. Як зазначав Альберт Ейнштейн, найважливіша проблема, що залишається нерозв’язаною протягом тисячоліть через свою складність, – це проблема руху. Власне, вчення про рух стало наукою лише з часів Галілео Галілея та Ісаака Ньютона.

Кінематика, основи якої були розглянуті в розділі 1, вивчає конкретні механічні рухи тіл без урахування їхньої взаємодії з іншими тілами. Вона фактично з’ясовує найпростіші просторово-часові залежності, зокрема зміну координат тіла або матеріальної точки з плином часу (як функцію часу). Тому кінематику часто називають геометрією руху.

**Кінематика вивчає механічні рухи тіл без урахування їхньої взаємодії з іншими тілами.**



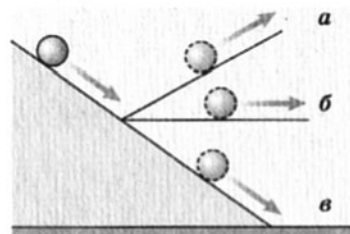
**Динаміка (від грец. – сильний, сила) – розділ механіки, у якому вивчається рух матеріальних тіл під дією прикладених до них сил.**



У механіці, крім кінематичного опису рухів, виникає необхідність установаження причин зміни стану руху тіла, для чого й розглядають механічний рух тіла, на яке діють інші тіла, або, як кажуть, що рухається під дією прикладених до нього сил. Такий аспект механічного руху вивчається в розділі механіки, що називається динамікою.

## § 15. Перший закон механіки Ньютона. Інерціальні системи відліку

Певний час у процесі розвитку фізичної науки ніхто не піддавав сумніву думку Арістотеля, яку він висловив у праці «Механіка»: «Тіло, яке рухалося, зупиняється, якщо сила, що штовхає його, припиняє свою дію».



Мал. 2.1. До міркувань Г. Галілея про рух кульки похилою площиною:

- a* – швидкість зменшується;
- б* – швидкість залишається сталою;
- в* – швидкість збільшується

Це помилкове твердження, що ґрунтується на побутовому сприйманні явищ природи, спростував Галілео Галілей, зробивши найважливіший для науки висновок про вічність, незнищенність руху. Аналізуючи рух кульки похилою площиною (мал. 2.1), він писав: «...швидкість, яку одного разу надали тілу, буде достеменно зберігатися, оскільки ліквідовано зовнішні причини прискорення і сповільнення – тобто умови, які виникають лише під час руху горизонтальною площиною, тому що під час руху похилою площиною вниз

уже існує причина прискорення, тоді як під час руху похилою площиною вгору наявне сповільнення; через це можна сказати, що рух горизонтальною площиною вічний, оскільки в разі сталої швидкості рух не може бути зменшено або послаблено, а тим більше знищено».

Цей фундаментальний висновок Г. Галілея використав І. Ньютон у своїй відомій праці «Математичні начала натуральної філософії» (1687 р.) і сформулював його як перший закон механіки (закон інерції):

Будь-яке тіло продовжує утримуватися у своєму стані спокою або рівномірного і прямолінійного руху доти, доки не спонукається прикладеними силами змінити цей стан.

**А. Ейнштейн і Л. Інфельд у праці «Еволюція фізики» дещо простіше сформулювали закон інерції: «Будь-яке тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо воно не змушене змінити його під впливом діючих сил».**

Рух кульки похилою площиною з міркувань Галілея розглядали відносно поверхні Землі, яка вважається нерухомою. Отже, перший закон динаміки встановлений для систем відлі-

ку, які вважаються нерухомими або рухаються відносно них прямолінійно, рівномірно і поступально. Такі системи називаються **інерціальними**. Інертність тіл проявляється у збереженні ними свого стану спокою або прямолінійного і рівномірного руху доти, доки з якоїсь зовнішньої причини вони не вийдуть із цього стану.

Властивість інертності, яка притаманна всім тілам, полягає в тому, що для зміни швидкості тіла потрібен певний час. З двох взаємодіючих тіл інертніше те, яке повільніше змінює свою швидкість.

Теоретично інерціальних систем відліку може бути безліч, оскільки завжди можна уявити багато тіл, що перебувають у стані спокою чи рухаються рівномірно і прямолінійно (без прискорення), та зв'язати з ними відповідну кількість систем координат і пристроїв для відліку часу (годинників).

Поняття інерціальної системи відліку є науковою абстракцією. У реальному житті таких систем немає, оскільки у природі відсутні абсолютно нерухомі тіла (наприклад, тіло, яке нерухоме відносно Землі, обертається навколо земної осі разом із Землею, рухається навколо Сонця тощо).

Тому під час розв'язування задач динаміки систему відліку зв'язують з реальним тілом, коли вона може вважатися інерціальною з певним наближенням. Так, наприклад, розв'язуючи задачі небесної механіки і космонавтики з високим ступенем точності, інерціальною можна вважати геліоцентричну систему з початком відліку на Сонці та осями, спрямованими на певні зорі. Для розв'язування більшості земних задач за інерціальну беруть систему відліку, зв'язану із Землею.

Рух за інерцією – рівномірний і прямолінійний, коли на тіло не діють зовнішні тіла. Але дії інших тіл на розглядуване тіло позбутися неможливо. Реально ми його спостерігаємо досить часто. Наприклад, під час різкого гальмування транспорту люди в ньому за інерцією нахиляються в бік напрямку руху.

**Тіло більшої маси складніше розігнати до певної швидкості або зупинити, ніж тіло меншої маси, тобто тіла більшої маси інертніші.**



**Поняття інерціальної системи відліку є науковою абстракцією.**



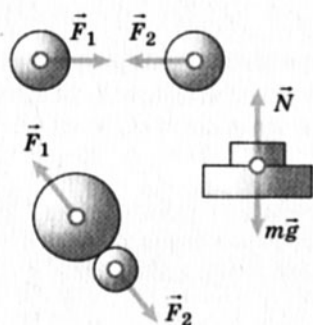
**Під час розв'язування задач динаміки систему відліку зв'язують з реальним тілом, наприклад Землею або Сонцем.**



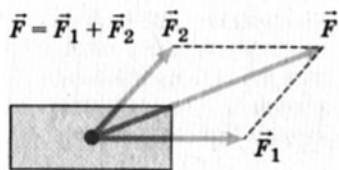
1. У чому полягає зміст першого закону механіки Ньютона?
2. У чому сутність явища інерції?
3. Що характеризує інертність тіл?
4. Які системи відліку вважаються інерціальними? Чи існують такі системи в природі?
5. Чи існують у природі рухи за інерцією?

## § 16. Сила. Додавання сил. Маса

Завдання динаміки – за діючою силою визначити рух тіла або за характером руху тіла встановити, яка сила на нього діє. Поняття про силу є одним з основних у механіці.



Мал. 2.2. Сила є характеристикою взаємодії тіл



Мал. 2.3. Рівнодійна двох сил

Ньютон чітко визначив: те, що ми називаємо силою, завжди є дією одного тіла на інше (взаємодією тіл).

Дія одних тіл на інші надає їм прискорення. Набуття тілом прискорення є зовнішнім проявом того, що тіло або їх група подіяли на досліджуване тіло. Коли ми говоримо «сила», то розуміємо, що на дане тіло діють інші тіла в процесі свого руху.

Сила зумовлює зміну стану руху тіл або їх деформацію і є характеристикою взаємодії тіл (мал. 2.2), яка відбувається в разі безпосереднього контакту (наприклад, зіткнення тіл) або через поля.

Сила – це векторна фізична величина, що характеризує дію, яка спричинює зміну стану руху тіла.

Дію на тіло кількох сил можна замінити їх рівнодійною (мал. 2.3), яку визначають геометричним додаванням цих сил (як векторів). Це можливо тому, що кожна сила діє на тіло так, ніби немає інших сил. Рівнодійна прикладених до тіла сил дорівнює:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \sum \vec{F}_i.$$

**Не швидкість тіла, а її зміна є наслідком дії сили (дії інших тіл).**



Крім значення і напрямку, сила характеризується ще й **точкою прикладання**, яку можна переміщати лише вздовж лінії дії сили, якщо тіло абсолютно тверде (не деформується). Оскільки дії сил незалежні, то сила може бути розкладена на складові  $\vec{F}_x$  і  $\vec{F}_y$  (мал. 2.4) як проєкції на координатні осі.

Для того щоб виявити інертність тіл і побачити, яку роль відіграє час взаємодії, проведемо такий дослід. На тонкій нитці підвісимо вантаж (мал. 2.5, а). Знизу до вантажу прикріпимо таку саму нитку. Якщо різко смикнути за нижню нитку, то вона порветься, а вантаж продовжуватиме висіти на верхній нитці (мал. 2.5, б).

Якщо нижню нитку тягнути повільно, то обірветься верхня нитка (мал. 2.5, в).

Коли за нижню нитку смикнути різко, то час взаємодії руки і нитки буде таким малим, що вантаж не встигне змінити свою швидкість – верхня нитка не порветься, отже, вантаж має значну інертність.

Коли ж за нижню нитку тягти повільно (рука діє на вантаж тривалий час), то вантаж набуває такої швидкості, що його переміщення достатнє для розривання і без того розтягнутої верхньої нитки.

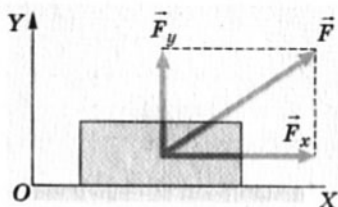
Як ви вже знаєте, інертність тіл визначається їхньою масою, тобто **маса тіла – характеристика його інертності**.

Ретельні дослідження взаємодії двох тіл, наприклад зіткнення двох абсолютно пружних кульок, показали, що **відношення модулів прискорень взаємодіючих тіл дорівнює оберненому відношенню їхніх мас**:

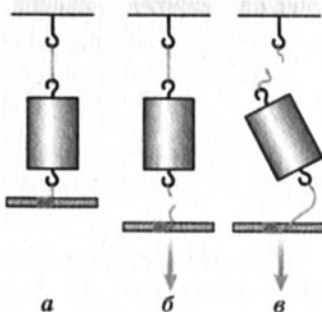
$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Із цього співвідношення випливає один з методів вимірювання маси тіл. Для цього вибирають тіло, масу якого умовно беруть за одиницю, – **еталон маси**. Між еталоном маси і тілом, масу якого треба виміряти, можна встановити стиснену за

**Сила завжди збігається за напрямком із прискоренням, а не зі швидкістю.**



Мал. 2.4. Розкладання сили



Мал. 2.5. Демонстрація інертності тіла



Мал. 2.6. Еталон кілограма

допомогою нитки пружинку. Потім нитку перепалити і визначити прискорення еталона  $a_{ет}$  і досліджуваного тіла  $a_T$ . Із співвідношення  $\frac{a_{ет}}{a_T} = \frac{m_T}{m_{ет}}$  знаходимо масу досліджуваного тіла:

$$m_T = m_{ет} \cdot \frac{a_{ет}}{a_T},$$

де  $m_T$  – маса тіла,  $a_T$  – прискорення тіла,  $m_{ет}$  і  $a_{ет}$  – маса й прискорення еталона (тобто одиниці маси).

За міжнародною угодою за одиницю маси взято масу еталона кілограма (мал. 2.6).

58

**Кілограм, кг – основна одиниця маси в Міжнародній системі одиниць (СІ). Кілограм дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма, що зберігається в Міжнародному бюро мір і ваги (м. Севр, поблизу Парижа). Це гиря з платино-іридієвого сплаву – 90 % Pt, 10 % Ir – у формі циліндра діаметром і заввишки 39 мм.**

**З достатньою точністю можна вважати, що масу 1 кг має 1 дм<sup>3</sup> чистої води (H<sub>2</sub>O) при 15 °С.**

Для вимірювання маси тіл часто використовують спосіб порівняння мас тіл за допомогою терезів. При цьому використовують здатність тіл взаємодіяти із Землею. Досліди підтверджують, що тіла, які мають однакову масу, однаково притягуються до Землі у даному місці.

1. Чи можна миттєво змінити швидкість тіла?
2. У чому полягає властивість інертності?
3. Яка величина характеризує інертність тіл?
4. Який зв'язок між масами тіл і прискореннями, що вони їх набувають під час взаємодії?
5. Що таке еталон маси?
6. Які способи визначення маси тіл ви знаєте?
7. Що є причиною прискорення тіл?
8. Що можна сказати про прискорення двох взаємодіючих тіл?
9. Чи можна сказати, що дії одних тіл на інші є причиною їх рухів?

## Вправа 8

1. Нерухомий алюмінієвий візок зіткнувся зі сталевим візком такого самого розміру, що рухався зі швидкістю 4 м/с. З якою швидкістю почав рухатися алюмінієвий візок? Сталевий візок після зіткнення мав швидкість 2 м/с.

2. Візок рухається горизонтальною поверхнею зі швидкістю 0,5 м/с. З ним зіткнувся інший візок, що рухався в тому самому напрямі зі швидкістю 1,5 м/с. Після зіткнення обидва візки продовжують рухатися у тому самому напрямі з однаковими швидкостями 1 м/с. Визначте відношення мас цих візків.

3. Візок рухається горизонтальною поверхнею зі швидкістю 30 м/с і зіштовхується з нерухомим візком, який має таку саму масу, що й перший. Унаслідок зіткнення рухомий візок зупиняється. З якою швидкістю рухатиметься другий візок після зіткнення?

## § 17. Другий закон механіки Ньютона

59

Другий закон механіки Ньютона встановлює зв'язок між кінематичними й динамічними величинами. Найчастіше він формулюється так: **прискорення, якого набуває тіло під дією сили, прямо пропорційне силі, обернено пропорційне масі тіла і має той самий напрям, що й сила:**

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

де  $\vec{a}$  – прискорення;  $\vec{F}$  – рівнодійна сил, що діють на тіло;  $m$  – маса тіла.

Якщо з цього виразу визначити силу

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

то маємо другий закон динаміки в іншому формулюванні: **сила, що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла на прискорення, якого надає ця сила.**

І. Ньютон сформулював другий закон механіки дещо інакше, увівши поняття кількості руху. У сучасній фізиці його називають імпульсом тіла.

**Другий закон механіки Ньютона:**

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



**Кількість руху, або імпульс (від лат. *impulsus* – удар, поштовх), дорівнює добутку маси тіла на його швидкість:**

$$m\vec{v}.$$

Оскільки прискорення

$$\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{\Delta t}, \text{ то } \frac{m(\bar{v} - \bar{v}_0)}{\Delta t} = \bar{F},$$

звідси

$$\frac{m\bar{v} - m\bar{v}_0}{\Delta t} = \bar{F} \text{ або } \frac{\Delta(m\bar{v})}{\Delta t} = \bar{F}.$$



**Зміна кількості руху тіла пропорційна діючій силі і відбувається у напрямі прямої, вздовж якої ця сила діє.**

У формулюванні І. Ньютона другий закон механіки стверджує: **зміна кількості руху тіла пропорційна діючій силі і відбувається у напрямі прямої, вздовж якої ця сила діє.**

$$\frac{\Delta(m\bar{v})}{\Delta t} = \bar{F}$$



60

**Дія сил не спричиняє самого руху, а лише змінює його; сила викликає зміну швидкості, тобто прискорення, а не саму швидкість.**

Другий закон механіки узагальнив виключно важливий факт: **дія сил не спричиняє самого руху, а лише змінює його; сила викликає зміну швидкості, тобто прискорення, а не саму швидкість.**



1. Як зв'язані між собою такі фізичні величини, як прискорення, сила і маса тіла?
2. Чи можна за формулою  $\bar{F} = m\bar{a}$  стверджувати, що сила, яка діє на тіло, залежить від його маси і прискорення?
3. Що таке імпульс тіла (кількість руху)?
4. Які формулювання другого закону механіки ви знаєте?
5. Який важливий висновок можна зробити з другого закону механіки?

## Вправа 9

Тіло, маса якого дорівнює 2 кг, рухається прямолінійно і за 4 с змінило свою швидкість з 1 м/с до 2 м/с. Визначити: а) з яким прискоренням рухалося тіло; б) силу, що діє на тіло у напрямку його руху; в) який імпульс сили, що діяла на тіло; г) яку відстань пройшло тіло за розглянутий час руху.

## § 18. Третій закон механіки Ньютона

За третім законом механіки Ньютона сила є наслідком взаємодії двох або більшої кількості тіл. Коли одне тіло діє на друге, то обов'язково і друге тіло діє на перше, тобто якщо є «дія», то є й «протидія». Проте поняття «дії» і «протидії» цілком умовні, тому що кожна з них може бути і тим і іншим.

Візьмемо два однакові за масою візки і до одного з них прикріпимо плоску пружину, що стиснена ниткою. Другий візок поставимо так, щоб він також торкався стисненої пружини (мал. 2.7, а).

Якщо тепер нитку, яка стискує пружину, перерізати або перепалити, то пружина розпрямитися, обидва візки почнуть рухатися. Це означає, що вони набули прискорень:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m_1}, \quad \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m_2}.$$

Оскільки маси візків однакові, то й прискорення повинні бути однакові.

Коли на один з візків покласти додатковий вантаж (збільшити його масу) і повторити дослід (мал. 2.7, б), то візок, що має більшу масу, набуде меншого прискорення, адже  $a \sim \frac{1}{m}$ .

У разі взаємодії двох тіл відношення модулів їх прискорень дорівнює оберненому відношенню їх мас:

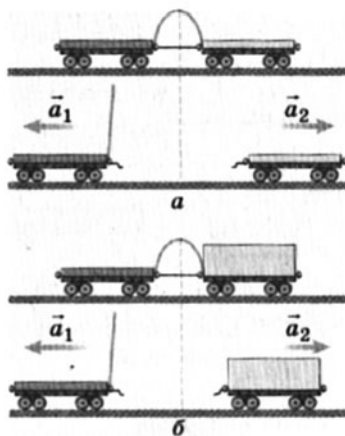
$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}, \quad \text{або} \quad m_1 a_1 = m_2 a_2.$$

Прискорення взаємодіючих тіл мають протилежні напрямки, тому у векторній формі можна записати

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

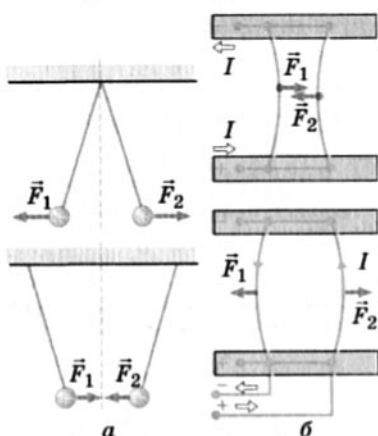
Добуток маси тіла на його прискорення дорівнює прикладеній до тіла силі.  $\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1$  – сила, яка діє на перше тіло з боку другого тіла, а  $\vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2$  – сила, яка діє на друге тіло з боку першого. Отже,

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



Мал. 2.7. Взаємодія візків

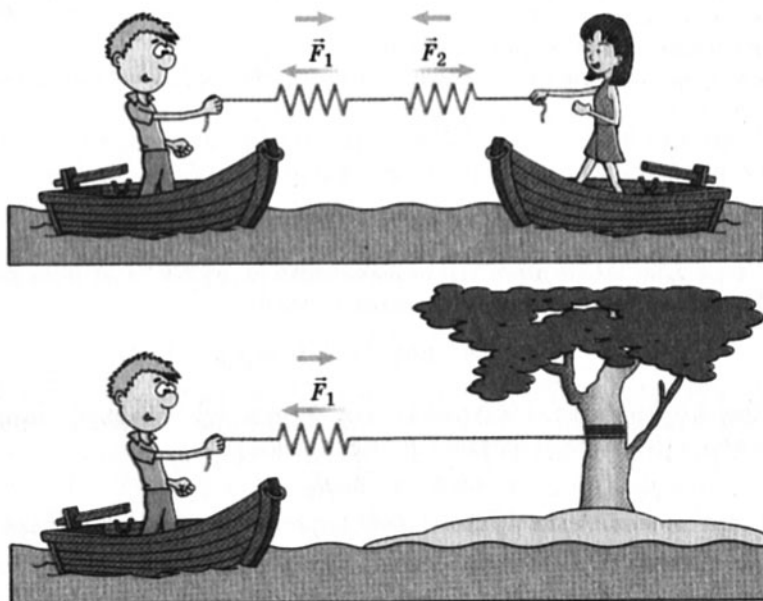
Ця рівність і є математичним виразом третього закону динаміки. За формулюванням Ньютона: у дії завжди є однакова і протилежно напрямлена протидія, тобто взаємодії двох тіл однакові між собою і спрямовані у протилежні боки.



Мал. 2.8. Електрична і магнітна взаємодії

Існує ще й таке формулювання: будь-яка дія тіл одне на одне має характер взаємодії; сили, з якими взаємодіють тіла, завжди однакові і протилежні за напрямом.

Досліди показують, що сили будь-якої природи під час взаємодії тіл виникають попарно, мають протилежні напрями, однакові за модулем. Природа обох сил під час взаємодії однакова. На малюнку 2.8 показані електрична (а) й магнітна (б) взаємодії, а на малюнку 2.9 – взаємодії у разі виникнення в тілах сил пружності.



Мал. 2.9. Взаємодії, коли в тілах виникають сили пружності

У третьому законі механіки йдеться про сили, прикладені до різних тіл. Унаслідок цього не можна вважати, що сума сил,

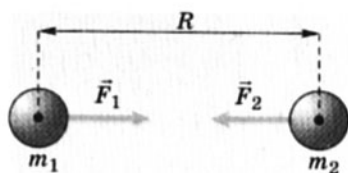
прикладених до кожного з взаємодіючих тіл, дорівнює нулю. Рівнодійну для сил можна шукати лише в тому разі, коли сили прикладені до одного тіла.

1. За допомогою яких дослідів можна встановити третій закон механіки?
2. Сформулюйте третій закон механіки.
3. Чи є відмінність між «дією» і «протидією»?
4. Чи зрівноважують одна одну сили, що виникають унаслідок взаємодії тіл?

## § 19. Гравітаційні сили. Закон всесвітнього тяжіння

У механіці вивчають сили тяжіння (гравітаційні сили), сили пружності і сили тертя.

Гравітаційна сила є проявом закону всесвітнього тяжіння, який сформулював Ньютон: гравітаційне притягання існує між усіма тілами; будь-які два тіла, розмірами яких можна знехтувати, притягуються одне до одного з силою, що прямо пропорційна масам цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними (мал. 2.10):



Мал. 2.10. Гравітаційна взаємодія

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

де  $G$  – коефіцієнт пропорційності, що називається гравітаційною сталою.

$$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Гравітаційна стала не залежить від середовища, в якому перебувають тіла, від їхнього руху, фізичних і хімічних властивостей. Її числове значення вперше визначив дослідним шляхом у 1798 р. англійський учений Г. Кавендіш.

Закон всесвітнього тяжіння справджується для точкових тіл, коли їхні лінійні розміри набагато менші від відстані між ними, а також для однорідних куль, наприклад система Земля–Місяць, або однорідної кулі і точкового тіла, наприклад обертання штучного супутника навколо Землі. Гравітаційна сила в такому разі спрямована вздовж лінії, яка сполучає центри мас тіл, що взаємодіють.

Гравітаційна сила, з якою Земля притягує до себе тіла, надаючи їм прискорення вільного падіння, називається **силою тяжіння** (мал. 2.11):

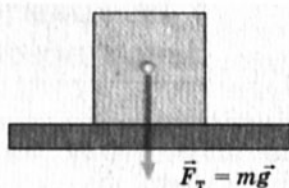
$$\vec{F}_T = m\vec{g},$$

де  $m$  – маса тіла;  $g$  – прискорення вільного падіння, числове значення якого залежить від географічної широти місцевості і висоти над землею поверхнею (рівнем моря).

Сила тяжіння прикладена до тіла (центра мас) і спрямована вертикально вниз, перпендикулярно до горизонтальної поверхні (мал. 2.12).



Мал. 2.11. Сила тяжіння



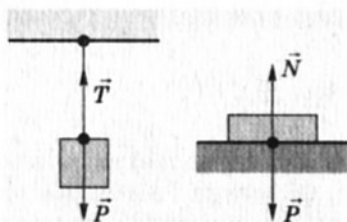
Мал. 2.12. Напрямок сили тяжіння

64

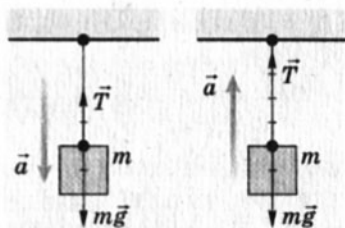
Під час розв'язування задач досить часто застосовують поняття ваги тіла, тобто сили, з якою тіло діє на підставку чи підвіс унаслідок тяжіння, зокрема, до Землі (мал. 2.13).

Якщо тіло в інерціальній системі відліку нерухоме або рухається рівномірно й прямолінійно, то його вага дорівнює силі тяжіння:  $P = F_T = mg$ .

Під час рівноприскореного руху тіла вгору або вниз із прискоренням  $\vec{a}$  вага тіла змінюється на величину  $m\vec{a}$  (мал. 2.14).



Мал. 2.13. Вага тіла



Мал. 2.14. Зміна ваги тіла, що рухається з прискоренням

Отже, під час руху вниз  $P = m(g - a)$ , а під час руху вгору  $P = m(g + a)$ . У разі вільного падіння ( $a = g$ ) тіла перебувають у стані невагомості, тобто їхня вага дорівнює нулю ( $P = 0$ ).

Міркування про силу тяжіння на Землі такі ж самі й для інших планет, Місяця, Сонця чи інших небесних тіл.



Якщо в другому законі динаміки маса характеризує інертні властивості тіл, то в законі всесвітнього тяжіння – їх гравітаційні властивості.

**Маса характеризує інертні та гравітаційні властивості тіл.**



Розглянемо приклад розв'язування задачі на дію гравітаційної сили.

**Задача.** Яку швидкість треба надати тілу, щоб воно стало штучним супутником планети і оберталося по коловій орбіті на висоті  $h$ , якщо маса планети  $M$ , її радіус  $R$ ?

### Розв'язання

У задачі чітко визначено характер руху тіла: траєкторія руху – коло; значення швидкості стали, напрямок швидкості в кожній точці траєкторії – уздовж дотичної. Сила гравітаційної взаємодії штучного супутника з планетою викликає прискорення.

Виконаємо малюнок відповідно до умови задачі (мал. 2.15). Вважаємо, що планета має форму кулі, а супутник не зазнає дії сил опору. Таким чином, на супутник діє лише сила гравітаційного притягання до планети, яка визначається законом всесвітнього тяжіння:

$$F = G \frac{Mm}{(R+h)^2},$$

де  $M$  – маса планети;  $m$  – маса супутника;  $G$  – гравітаційна стала.

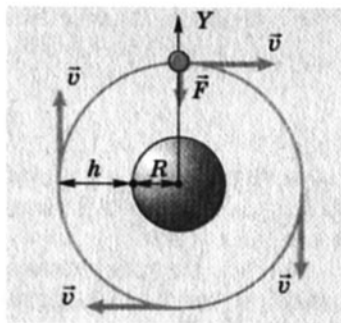
Як правило, під час руху по колу обирають вісь координат  $OY$  так, щоб вона була спрямована до центра кола або, навпаки, від нього.

Для штучного супутника планети запишемо рівняння другого закону механіки Ньютона у векторній формі:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Це рівняння подамо в скалярній формі, враховуючи напрям гравітаційної сили і прискорення:  $-F = -ma$ .

Оскільки швидкість супутника стала (за значенням), то сила притягання до планети надає йому лише доцентрового прискорення ( $a_d$ ). Отже, маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} G \frac{Mm}{(R+h)^2} = ma_d, \\ a_d = \frac{v^2}{R+h}. \end{cases}$$



Мал. 2.15. До розрахунку першої космічної швидкості


Ця система рівнянь легко розв'язується методом підстанов-

$$\text{ки: } v = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}.$$

Шукана швидкість буде однаковою для супутників різної маси, тобто не залежить від їхньої маси. Для певної планети вона визначається лише висотою над її поверхнею.

Щоб оцінити значення швидкості тіла, за якої воно стає штучним супутником планети, тобто першої космічної швидкості, скористаємося параметрами Землі:  $M = 6 \cdot 10^{24}$  кг,  $R = 6400$  км,  $h = 300$  км. Підставивши їх у формулу, дістанемо  $v = 7,7$  км/с.

*Відповідь:*  $v = 7,7$  км/с (для Землі).

- 
1. Як зміниться сила гравітаційної взаємодії між двома кулями, якщо: а) масу однієї з них зменшити в 2 рази; б) відстань між їхніми центрами збільшити в 2 рази?
  2. Що таке вага тіла?
  3. Як змінюється вага під час руху тіл по вертикалі?

66

## Вправа 10

1. Визначити силу натягу троса ліфта, маса якого дорівнює 500 кг, на початку і в кінці підйому, якщо прискорення в обох випадках  $2 \text{ м/с}^2$ .

2. Трос витримує навантаження на розрив 1 т. За який найменший час можна підняти вантаж масою 200 кг з шахти глибиною 80 м?

3. З якою силою взаємодіють Місяць і Земля, якщо маса Місяця  $7 \cdot 10^{22}$  кг, а Землі  $6 \cdot 10^{24}$  кг? Відстань між ними становить 384 000 км.

4. Чому дві людини не відчувають гравітаційного притягання одна до одної? Оцініть силу взаємодії між ними на відстані 1 м, якщо маса кожної 70 кг.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Вимірювання сил

**М е т а.** Удосконалити вміння вимірювати сили. Навчитися оцінювати значення абсолютних і відносних похибок вимірювання, раціонально вибирати засоби вимірювання, дотримуватися загальноприйнятих правил вимірювань.

**О б л а д н а н н я:** динамометр лабораторний; набір тягарців відомої маси; штатив.

## Теоретичні відомості

Необхідно повторити матеріал про фізичні величини, їхні одиниці, обчислення похибок вимірювань (див. Вступ).

Тягарці для лабораторних робіт розраховані й виготовлені так, щоб сила тяжіння, яка діє на них біля поверхні Землі, дорівнювала 1 ньютону. Тому вважатимемо цю силу відомою і рівною 1 Н.

Але якщо показчик динамометра з підвішеним до нього тягарцем зупиниться на поділці шкали, яка відповідає 1 Н, то це не означає, що сила тяжіння справді  $F_1 = 1$  Н, тому що для кожного приладу існує інструментальна похибка, значення якої вказується на самому приладі або в його паспорті. Існує також похибка відлічування, яка в сумі з інструментальною похибкою й дає значення абсолютної похибки даного вимірювання  $\Delta F$ . Можна вважати, що абсолютна похибка вимірювань з використанням даного приладу в усіх діапазонах вимірювань однакова, якщо в паспорті приладу немає інших вказівок.

Таким чином, абсолютна похибка показує межі значення вимірюваної величини: від  $(F_1 - \Delta F)$  до  $(F_1 + \Delta F)$ . Математично це записується так:  $F_1 = F_1 \pm \Delta F$ . Якщо виконати вимірювання з двома тягарцями, то  $F_2 = 2F_1 \pm \Delta F$ , з трьома –  $F_3 = 3F_1 \pm \Delta F$  і т. д.

Проте абсолютна похибка не повністю характеризує якість виконаного вимірювання. Тому вводять у використання відносну похибку вимірювання: *відношення абсолютної похибки вимірювання до умовного істинного значення вимірюваної величини*. В основному визначається в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} \cdot 100 \%.$$

У нашому випадку:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta F}{F_1} \cdot 100 \% ; \varepsilon_2 = \frac{\Delta F}{2F_1} \cdot 100 \% ; \varepsilon_3 = \frac{\Delta F}{3F_1} \cdot 100 \% \text{ і т. д.}$$

У стандартах вимірювань важливим є поняття точності вимірювання. Точність вимірювання – головна характеристика його якості, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Вона дорівнює оберненому значенню модуля відносної похибки. Точність конкретного вимірювання тим вища, чим менше значення відносної похибки даного вимірювання.



### Виконання роботи

1. З'ясувати, на які значення сил розрахований динамометр.
2. Установити, яка абсолютна похибка вимірювання сил  $\Delta F$  з використанням даного динамометра.
3. Послідовно виміряти сили тяжіння, що діють на один, два, три і т. д. однакові тягарці:  $F_1, 2F_1, 3F_1 \dots$
4. Дані вимірювань записати в таблицю і виконати необхідні обчислення.

№ вимірювання	Показ динамометра, $F, \text{H}$	Абсолютна похибка вимірювання, $\Delta F, \text{H}$	Значення сили, $(F \pm \Delta F), \text{H}$	Відносна похибка вимірювання

68

5. Проаналізувати результати дослідження і зробити висновки: а) коли точність вимірювань сили вища – коли її значення перебуває на початку шкали динамометра чи ближче до кінця шкали? б) під час вимірювання сили якого значення з використанням даного динамометра точність вимірювання буде найвищою (відносна похибка вимірювання найменша)? в) чи варто при виборі приладу для вимірювань враховувати приблизні значення вимірюваних величин? Чому?

### Додаткові завдання

Узяти кілька тіл невідомої маси і визначити для кожного з них силу тяжіння, похибки та точність вимірювання сил, що діють на них.

## § 20. Сила пружності

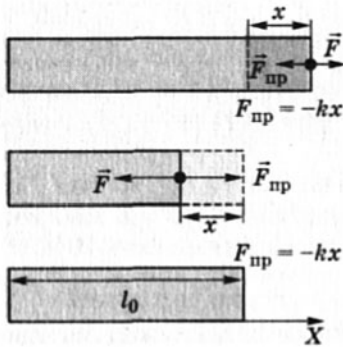
Як відомо, взаємодія тіл може викликати не тільки зміну їхніх швидкостей, а й деформації. Сила, що при цьому виникає, називається **силою пружності**.

Англійський природодослідник, учений та експериментатор Роберт Гук відкрив закон, який було названо його ім'ям. Досліджуючи пружні деформації різних тіл, він встановив, що деформація пружних тіл (їхнє видовження чи скорочення) прямо пропорційна силі, яка їх розтягує чи стискує (мал. 2.16), а сила пружності дорівнює:

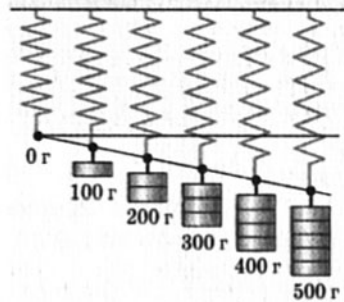
$$F_{\text{пр}} = -kx,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який називається жорсткістю, характеризує здатність тіла протидіяти деформації;  $x$  – абсолютна деформація (лінійне видовження чи стиснення тіла).

Мінус показує, що напрям сили пружності протилежний до напрямку зміщення краю деформованого тіла.



Мал. 2.16. Закон Гука



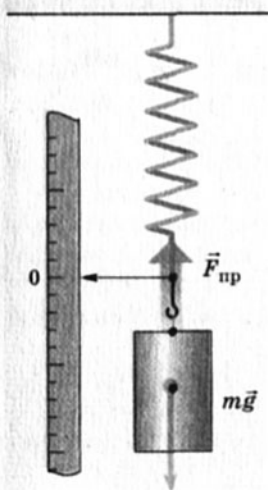
Мал. 2.17. Дослідження розтягу пружини

На малюнку 2.17 подано результати досліду з вивчення залежності видовження пружини від сил, які на неї діють, коли підвішено тягарці масою 100 г, 200 г... у гравітаційному полі Землі. Порівняйте ці дані з одержаними вами в лабораторній роботі № 2.

Під час розв'язування задач з урахуванням сили пружності необхідно чітко уявляти її напрям і до якого тіла вона прикладена. Слід пам'ятати, що деформація тіла під дією зовнішньої сили викликає силу пружності, яку визначають за законом Гука.

Якщо в полі сили тяжіння до пружини підвісити тіло (мал. 2.18), то під дією сили тяжіння воно буде опускати. У пружині виникне сила пружності, що поступово зростатиме. Коли сила пружності дорівнюватиме силі тяжіння ( $F_{\text{пр}} = F_{\text{т}}$ ), то тіло перебуватиме у стані спокою. Обидві розглянуті сили прикладені до тіла і спрямовані у протилежних напрямках. У стані рівноваги тіла їхня рівнодійна дорівнюватиме нулю.

Силу пружності, що діє на тіло з боку опори або підвісу, називають силою реакції опори.



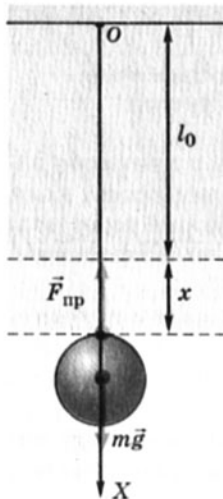
Мал. 2.18. Сили тяжіння і пружності

**Природа сил пружності – електромагнітна.** Ця сила зумовлена взаємодією молекул та атомів, з яких вони утворюються. Сили взаємодії між молекулами й атомами мають таку особли-

вість: зі збільшенням відстані між ними вони є силами притягання, а зі зменшенням – силами відштовхування. Цим і пояснюється виникнення сил пружності та напрямів їх дії.

**Сила пружності напрямлена перпендикулярно (нормально) до поверхні стикання тіл, а в разі деформованих тіл (стержнів, пружин, ниток, тросів тощо) – уздовж їхніх осей.**

**Задача.** На дротині підвішено вантаж масою 10 кг (мал. 2.19). Довжина дротини збільшилася на 0,5 мм. Яка її жорсткість? За прискорення вільного падіння взяти  $10 \text{ м/с}^2$ .



Мал. 2.19. Вантаж на дротині

**Дано:**  $m = 10 \text{ кг}$ ,  
 $x = 0,5 \text{ мм}$ ,  
 $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  
 $k - ?$

**Розв'язання**  
 Вантаж, підвішений на дротині, перебуває у стані спокою. Сила пружності  $\vec{F}_{\text{пр}}$  за модулем дорівнює силі тяжіння  $m\vec{g}$ :  
 $F_{\text{пр}} = mg$ . Їх проекції на вісь  $OX$  теж однакові:

$$F_x = mg_x; F_{\text{пр}} = -kx \text{ або } F = mg; F_{\text{пр}} = kx.$$

Отже,  $mg = kx$ , звідси  $k = \frac{mg}{x}$ ;

$$k = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 200\,000 \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 200 \frac{\text{кН}}{\text{м}} = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 2 \cdot 10^2 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

**Відповідь:**  $k = 2 \cdot 10^2 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ .

1. За яких умов виникають сили пружності?
2. Яка природа сил пружності?
3. Які особливості сил пружності?
4. За яких умов виникають деформації?
5. У чому сутність закону Гука?
6. Що таке жорсткість тіла?
7. Що таке реакція опори (підвісу) і як вона напрямлена?

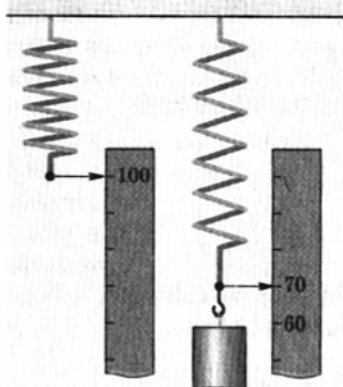
## Вправа 11

1. За малюнком 2.17: а) побудувати графік залежності вдовження пружини (виміри зробити в міліметрах) від прикладеної до неї сили; б) визначити жорсткість пружини для всіх

випадків прикладання до неї сил, які показано на малюнку; в) зробити висновки.

2. Якщо видовжити пружину на 0,12 м, то виникає сила пружності 0,004 кН. На скільки треба подовжити пружину, щоб сила пружності дорівнювала 10 Н?

3. На малюнку 2.20 показано нерозтягнуту пружину, яку навантажили тягарцем масою 1 кг, поруч – метрова лінійка. Визначити: а) на якій поділці лінійки зупиниться стрілка, якщо до тягарця підвісити ще такий самий тягарець; б) жорсткість пружини.



Мал. 2.20. До заґачі 3

## § 21. Сила тертя

З давніх-давен проблеми тертя цікавили людство. Досліджував його, зокрема, видатний художник і вчений епохи Відродження Леонардо да Вінчі.

Залежно від характеру взаємодії розрізняють внутрішнє і зовнішнє тертя.

Тертя називають зовнішнім, коли тіла взаємодіють своїми поверхнями. Внутрішнім вважають тертя, що виникає в рідинах і газах під час руху їх шарів один відносно одного.

У площині дотику поверхонь двох тіл, які рухаються одне відносно одного, виникає сила, що протидіє їх взаємному переміщенню. Ця сила називається силою тертя.

Сила тертя існує не лише під час відносного руху тіл, а й у разі їхнього відносного спокою (сила тертя спокою).

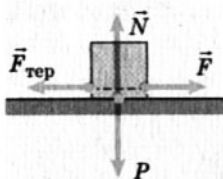
**Сила тертя спокою дорівнює зовнішній силі, яка намагається зсунути тіло з місця. Вона спрямована протилежно до напрямку прикладеної сили.**

Залежно від виду переміщення одного тіла по іншому розрізняють **тертя ковзання** і **тертя кочення**.

Сила тертя ковзання визначається за формулою:

$$F_{\text{тер}} = \mu P,$$

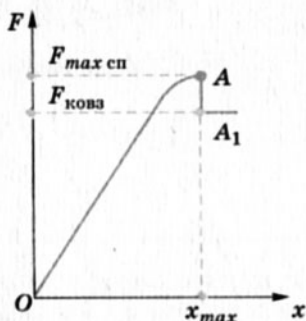
де  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання, що характеризує природу та якість поверхонь, що дотикаються (шорсткість, хвилястість,



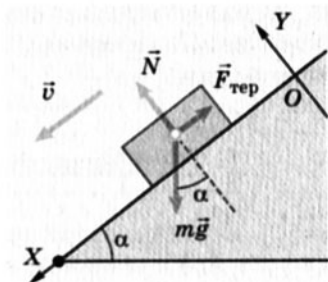
Мал. 2.21. Сила тертя

температура тощо);  $P$  – сила, з якою тіло діє в перпендикулярному напрямі до поверхні, по якій воно рухається. Ця сила за модулем дорівнює силі реакції поверхні  $N$ , яка діє на тіло  $P = N$  (мал. 2.21).

Якщо до тіла приєднати динамометр, який вимірює силу  $\vec{F}$ , що може привести тіло в рух, і рівномірно тягнути його вздовж поверхні, по якій ковзає тіло, то воно спочатку буде нерухомим – спостерігається тертя спокою (мал. 2.22, ділянка  $OA$ ).



Мал. 2.22. Сила тертя спокою і ковзання



Мал. 2.23. Рух тіла по похилій площині

У разі досягнення силою  $F$  значення  $F_{max}$  тіло починає рухатись і тертя спокою переходить у тертя ковзання. Сила тертя ковзання дещо менша від максимальної сили тертя спокою (точка  $A_1$ ).

За подальшого рівномірного руху тіла розтяг пружини динамометра буде незмінним і меншим від максимального значення сили тертя спокою  $F_{max}$ .

Якщо розглядати рух тіла по похилій площині (мал. 2.23), то на значення сили реакції опори впливає кут нахилу цієї площини до горизонту  $\alpha$ :  $N = mg \cos \alpha$ .

Отже,

$$F_{\text{тер}} = \mu mg \cos \alpha.$$

На коефіцієнт тертя ковзання впливає наявність між поверхнями, що труться, різних речовин – мастил, плівок тощо.

Значення коефіцієнта тертя ковзання залежно від характеру поверхонь, що труться, для сухого тертя (без мастил) подані в таблиці 1.

Сила тертя кочення має складнішу залежність, яка так само зумовлена деформацією поверхонь, що дотикаються.



Таблиця 1

## Коефіцієнт тертя ковзання

Контактуючі поверхні	$\mu$	
	спокою	під час руху
Деревина по деревині	0,65	0,33
Метал по деревині	0,60	0,40
Залізо по залізу	0,15	0,14
Сталь по сталі	0,15–0,25	0,09
Каучук по деревині чи металу	0,80	0,55
Гума по твердому ґрунту	0,4–0,6	0,3–0,5
Лід по льоду	–	0,028
Деревина по льоду	–	0,035
Залізо по льоду	–	0,020
Сталь по льоду (ковзани)	0,02	0,015

**Задача.** Горизонтальною дорогою тягнуть за мотузку під кутом  $30^\circ$  санки з вантажем, загальна маса яких 80 кг. Сила натягу 50 Н. Визначити коефіцієнт тертя ковзання, якщо санки рухаються рівномірно та з прискоренням  $0,15 \text{ м/с}^2$ .

Дано:

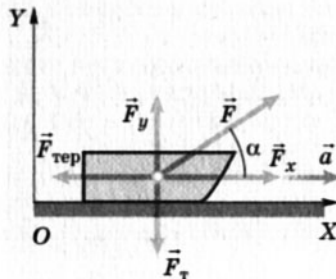
$m = 80 \text{ кг}$ ,  
 $\alpha = 30^\circ$ ,  
 $F = 50 \text{ Н}$ ,  
 $a = 0,15 \text{ м/с}^2$ .

$\mu_1 - ?$   $\mu_2 - ?$

Розв'язання

На санки діють сили: тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ , реакції дороги  $\vec{N}$ , натягу  $\vec{F}$  і тертя  $\vec{F}_{\text{тер}}$ .

Виконаємо малюнок, зв'язавши систему координат із Землею (мал. 2.24).



Мал. 2.24. Рух санок з вантажем

Спочатку розглянемо випадок, коли санки рухаються рівномірно. У такому разі силу тертя  $F_{\text{тер}}$  урівноважує проекція сили натягу мотузки на вісь  $OX$ :

$$F_{\text{тер}} = F_x; \quad F_x = F \cdot \cos \alpha; \quad F_{\text{тер}} = \mu mg.$$

$$\text{Отже, } \mu_1 = \frac{F \cdot \cos \alpha}{mg}; \mu_1 = \frac{50 \text{ Н} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{80 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 0,055.$$

Для рівноприскореного руху запишемо другий закон механіки Ньютона для санок у векторній формі:

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{тер.}}$$

У проєкціях на координатні осі це рівняння матиме вигляд:

$$\text{на вісь } OX: ma = F \cos \alpha - F_{\text{тер.}}$$

$$\text{на вісь } OY: 0 = F \sin \alpha + N - mg.$$

Оскільки  $F_{\text{тер.}} = \mu N$ , складемо систему рівнянь:


$$\begin{cases} \mu N = F \cos \alpha - ma, \\ N = mg - F \sin \alpha. \end{cases}$$

Підставивши друге рівняння в перше, дістанемо

$$\mu_2 = \frac{F \cos \alpha - ma}{mg - F \sin \alpha}; \mu_2 = \frac{50 \text{ Н} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - 80 \text{ кг} \cdot 0,15 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{80 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} - 50 \text{ Н} \cdot 0,5} = 0,04.$$

Значення коефіцієнтів тертя відрізняються, оскільки у випадку рівноприскореного руху зменшується сила  $\vec{N}$ .

**Відповідь:**  $\mu_1 = 0,055$ ;  $\mu_2 = 0,04$ .

- 
- Людина намагається зрушити з місця шафу, але вона залишається в стані спокою. Чи порушується в цьому разі другий закон механіки Ньютона?
  - Чи діє сила тертя спокою на стіл, що стоїть на горизонтальній підлозі?
  - За яких умов виникає сила тертя спокою? Як вона напрямлена?
  - Що таке сила тертя? Який її напрям?
  - Від чого залежить сила тертя ковзання?
  - Що таке коефіцієнт тертя?
  - Від чого залежить коефіцієнт тертя?
  - Які корисні і шкідливі прояви тертя ви знаєте?
  - Які способи збільшення і зменшення тертя вам відомі?

## Вправа 12

1. З якою силою потрібно штовхати дерев'яний брусок масою 20 кг по дерев'яній горизонтальній підлозі, щоб він рухався зі сталою швидкістю?

2. Автомобіль масою 1 т рухається зі швидкістю 36 км/год. Під час аварійного гальмування до повної зупинки він пройшов шлях 10 м. Визначити коефіцієнт тертя ковзання коліс.



## § 22. Як розв'язувати задачі динаміки

**Типи задач.** У динаміці розглядають два типи задач, розв'язування яких ґрунтується на законах Ньютона для матеріальної точки:

1) знаючи сили, що діють на тіло, знайти рівняння руху (наприклад, знайти закон руху тіла, зокрема час і дальність польоту, траєкторію), а знаючи його масу, – початкову швидкість і силу опору;

2) з рівняння руху тіла визначити діючі на нього сили (наприклад, визначити силу тертя коліс автомобіля, якщо відомо швидкість руху і пройдений автомобілем шлях до повної зупинки).

Підкреслимо, що під час поступального руху тіло можна вважати матеріальною точкою, розміщеною в центрі мас.

Для розв'язування задач першого типу необхідно знати початкові умови (координати, швидкість). Якщо відомо сили, що діють на тіло, і їх вважають сталими, то прискорення тіла знаходять з рівняння  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$  і тоді рівняння його руху визначають за формулами кінематики.

Таким чином, розв'язування задач першого типу можна класифікувати так:

### *Етапи розв'язування задач першого типу*

1. Знаючи силу  $F$  і масу тіла  $m$ , за другим законом динаміки визначають прискорення  $a$ , а потім за формулами кінематики – миттєву швидкість тіла  $v$ .

2. Знаючи швидкість, знаходять переміщення тіла  $s$  за формулами для рівноприскореного руху.

3. Записують закон (рівняння) руху тіла, наприклад для координати  $x$  у довільний момент часу:

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

$$\text{або } x = x_0 + v_{0x}(t - t_0) + \frac{a_x(t - t_0)^2}{2}.$$

Задачі другого типу розв'язують аналогічним чином, тільки в зворотній послідовності.

*Етапи розв'язування задач другого типу*

1. За заданим рівнянням руху знаходять відповідні кінематичні величини.
2. Якщо прискорення тіла не вдалося встановити з рівняння (чи умови), визначають його за формулами кінематики.
3. Діючи на тіло силу знаходять з рівняння  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

**Особливості розв'язування задач.** Розглянемо особливості розв'язування задач динаміки і сформулюємо загальні рекомендації щодо застосування законів механіки Ньютона з урахуванням специфічних особливостей прояву сил різної природи (гравітаційної сили, сил пружності, тертя).

*Перша рекомендація щодо розв'язування задач*

Розв'язувати задачі динаміки починають з докладного опису явищ, що розглядаються в умові задачі. Далі обирають систему відліку, яку можна вважати інерціальною в даному разі. Слід пам'ятати, що від вибору системи відліку багато в чому залежить простота розв'язування задачі.

Враховуючи, що в шкільному курсі фізики розглядають лише рухи, що відбуваються в одній площині, достатньо обрати декартову систему координат на площині. Напрями осей обирають відповідно до умов конкретної задачі. Якщо дія всіх сил відбувається вздовж однієї прямої, досить взяти одну вісь і спрямувати її за напрямом руху тіла (вздовж напрямку дії сили).

*Друга рекомендація щодо розв'язування задач*

У разі застосування другого закону Ньютона його записують у векторній формі:  $m\vec{a} = \sum \vec{F}_i$ , а потім переходять до скалярних рівнянь, що пов'язують проекції сил і прискорень на відповідні координатні осі, враховуючи при цьому їх знаки. Для цього необхідно всі сили і прискорення розкласти на складові за напрямками координатних осей та записати другий закон Ньютона у вигляді:

$$ma_x = \sum F_x, \quad ma_y = \sum F_y.$$

Якщо в задачі достатньо обрати одну координатну вісь, то рівняння буде одне:  $ma_x = \sum F_x$ . Записуючи рівняння в проекціях, слід урахувати таке: якщо в даному напрямі тіло не зміщується або рухається рівномірно, то його прискорення дорівнює нулю, отже, сума проекцій усіх сил на цю вісь також дорівнює нулю.

Коли ж за умовою задачі необхідно знайти не лише сили і прискорення, а й координати, переміщення, швидкості та інші величини, що описують рух, то треба скористатися системою кінематичних рівнянь.

Якщо в даному напрямі тіло не зміщується або рухається рівномірно, то його прискорення дорівнює нулю, отже, сума проєкцій усіх сил на цю вісь також дорівнює нулю.



### Третя рекомендація щодо розв'язування задач

У розв'язках задач динаміки в явному чи неявному вигляді має місце третій закон Ньютона, оскільки сили завжди є результатом взаємодії тіл. Тому під час розв'язування задач динаміки потрібно чітко уявляти, з якими тілами взаємодіє розглядуване тіло, враховувати при цьому, що взаємодія може відбуватися в разі безпосереднього контакту або через поля. Слід зважати на те, що сили взаємодії прикладені до різних тіл і тому не можуть додаватися. При неправильному розумінні цього іноді виникає запитання: як може тіло, наприклад потяг, рухатися рівноприскорено, адже сила, з якою електровоз діє на вагони, дорівнює силі протидії з боку вагонів? Як правило, у таких випадках необхідно розглядати взаємодії всіх тіл: електровоз – вагони, електровоз – рейки, вагони – рейки. На відповідних малюнках треба показати всі сили, які діють на тіло, і врахувати, що кожна з них діє незалежно від інших і викликає прискорення (чи деформацію).

77

**Сили завжди є результатом взаємодії тіл.**

**Взаємодія може відбуватися в разі безпосереднього контакту або через поля.**

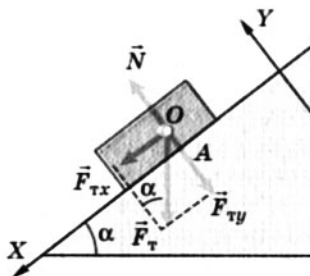
**Сили взаємодії прикладені до різних тіл і тому не можуть додаватися.**



### Четверта рекомендація щодо розв'язування задач

Слід пам'ятати, що в механіці розглядають лише три види сил: гравітаційні, пружності і тертя (опору). Немає так званих «прискорюючих», «скочуючих» і т. п. сил. Це, як правило, рівнодійні діючих на тіло сил або їх складові. Наприклад, «скочуюча сила» – це складова сили тяжіння в її проєкції на вісь, спрямовану вздовж похилої площини (мал. 2.25).

Не існує й «доцентрової сили» як самостійної сили особливої природи. Доцентрове прискорення надає тілу не яка-небудь особлива сила, а рівнодійна, що спрямована до центра кола перпендикулярно до швид-

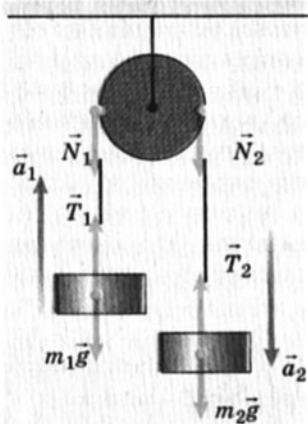


Мал. 2.25. Складові сили тяжіння надає тілу прискорення

кості. У небесній механіці, наприклад, такою силою є гравітаційна. Тому термін «доцентрова сила» використовують, щоб підкреслити, яка саме сила чи рівнодійна яких сил надає тілу доцентрового прискорення.

Типовою помилкою у складанні рівнянь для таких випадків є те, що на вісь проєктують як діючі на тіло сили, так і їхню рівнодійну, що веде до спотворення результату.

У задачах динаміки на рух зв'язаних тіл (мал. 2.26), як правило, накладається умова нерозтяжності і невагомості нитки, а також невагомості блока. Пояснимо, з якою метою це робиться.



Мал. 2.26. У багатьох задачах нехтують масою блока, а нитку вважають невагомою і нерозтяжною

Якщо два тіла зв'язано ниткою, то її нерозтяжність свідчить, що довжина нитки не змінюється і в ній не виникають унаслідок деформації додаткові сили пружності. На цій підставі можна зробити висновок, що сила натягу вздовж усієї нитки залишається незмінною і прискорення, які отримують ці тіла під дією даної сили, будуть однакові:

$$a_1 = a_2 = a.$$

Невагомість нитки вказує на те, що діючі сили натягу нитки  $\vec{T}_1$  і  $\vec{T}_2$  однакові:

$$T_1 = T_2 = T.$$

З умови невагомості блока можна вважати силу натягу нитки під час переходу через блок такою, що не змінюється за модулем:

$$N_1 = N_2.$$

**Алгоритм розв'язування задач.** Розв'язування задач динаміки може бути подане у вигляді певної послідовності дій – алгоритму, який побудований з урахуванням розглянутої послідовності розв'язування основної задачі механіки, а також логіки пізнавальної діяльності під час розв'язування фізичних задач узагалі. Основні кроки алгоритму можуть бути сформульовані так.

1. Визначити характер і напрям руху тіла. Встановити, з якими тілами взаємодіє тіло, рух якого розглядається в задачі.

2. Виконати малюнок. Показати всі сили, що діють на тіло. Обрати тіло відліку і зв'язати з ним систему координат.

3. Записати у векторній формі рівняння другого закону динаміки  $m\vec{a} = \sum \vec{F}$  для кожного з тіл.

4. Спроектувати на координатні осі сили, швидкості і прискорення. Записати рівняння другого закону динаміки в проекціях на координатні осі, враховуючи знаки проекцій векторів. Якщо в цій системі рівнянь кількість невідомих величин дорівнює кількості рівнянь або менша за неї, то задача математично сформульована правильно і може бути розв'язана. Інакше – треба записати додаткові рівняння, наприклад кінематичні, виходячи при цьому з фізичних міркувань.

5. Розв'язати рівняння чи систему рівнянь одним з відомих методів. Визначити числові значення шуканих величин і оцінити їх вірогідність.

6. Проаналізувати знайдену відповідь. Якщо вона суперечить фізичній сутності задачі, шукати нові ідеї її розв'язування.

7. Дослідити інші можливі шляхи розв'язування даної задачі. Знайти інший розв'язок задачі, виконати його і порівняти результати. Оцінити, який з розв'язків раціональніший.

Розглянемо приклади розв'язування задач.

### І. Сила тяжіння і вага

**Задача 1.** Шахтна кліть масою 10 т починає рівноприскорено рухатися вниз і опускається на 75 м за 10 с. Визначити силу натягу троса, на якому закріплена кліть, і вагу вантажу, який знаходиться всередині кліті, якщо його маса 80 кг.

Дано:

$M = 10 \text{ т} = 10^4 \text{ кг}$ ,  
 $m = 80 \text{ кг}$ ,  
 $s = 75 \text{ м}$ ,  $t = 10 \text{ с}$ .

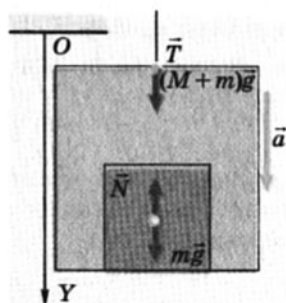
$T = ?$   $P = ?$

Розв'язання

1. У задачі невідомо натяг троса, який тримає шахтну кліть, і силу, з якою вантаж діє на підлогу кліті. Рух кліті та вантажу – рівноприскорений вниз, без початкової швидкості.

Шахтна кліть взаємодіє із Землею і тросом, вантаж у результаті притягання до Землі тисне на підлогу кліті. Природно, що кліть і вантаж мають однакове прискорення.

2. Виконаємо малюнок. За тіло відліку оберемо Землю і зв'яжемо з нею систему координат – вісь  $OY$ , спрямувавши її донизу (мал. 2.27). На кліть діє сила тяжіння, спрямована вертикально вниз, і сила натягу троса, спрямована вертикально вгору, на вантаж – сила тяжіння і сила реакції опори (підлоги). За означенням вага тіла  $P = N$ .



Мал. 2.27. Шахтна кліть з вантажем

3. Запишемо у векторній формі другий закон Ньютона для кожного тіла окремо: для шахтної кліті – рівняння (1), для вантажу – рівняння (2):

$$(M + m)\vec{a} = (M + m)\vec{g} + \vec{T}, \quad (1)$$

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}. \quad (2)$$

4. Запишемо ці рівняння в скалярній формі у проекціях на вісь  $OY$ :

$$(M + m)a = (M + m)g - T, \\ \text{або } T = (M + m)(g - a), \quad (3)$$

$$ma = mg - N, \text{ або } N = m(g - a). \quad (4)$$

Оскільки в цих рівняннях дві невідомі величини –  $T$  і  $a$  (3),  $N$  і  $a$  (4), запишемо кінематичне рівняння для прискорення:

$$l = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2l}{t^2}.$$

5. Рівняння (3) і (4) легко розв'язуються підстановкою прискорення  $a$ . Тому спочатку обчислюємо  $a$ :

$$a = \frac{2 \cdot 75 \text{ м}}{100 \text{ с}^2} = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Підставляючи його значення в (3) і (4), маємо:

$$T = 10^4 \text{ кг} \left( 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) = 8,3 \cdot 10^4 \text{ Н},$$

$$P = N = 80 \text{ кг} \left( 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) = 660 \text{ Н}.$$

6. Знайдена відповідь підтверджується життєвим досвідом людини, коли вона відчуває зменшення сили тиску на підлогу у момент початку руху ліфта вниз.

7. Якщо скористатися формулою ваги тіла, що прискорено рухається вниз  $P = m(g - a)$ , то отримаємо аналогічний результат ваги вантажу.

*Відповідь:*  $T = 8,3 \cdot 10^4 \text{ Н}$ ,  $P = 660 \text{ Н}$ .

## II. Дія сили пружності

**Задача 2.** Який шлях проходить кожний з важків (мал. 2.28) за першу секунду від початку руху, якщо їхні маси однакові?

### Розв'язання

1–2. Оскільки в умові задачі немає жодних відомостей про блок і нитки, природно припустити, що вони невагомі, тертям у блоці можна знехтувати, а нитки вважати нерозтяжними.



За умовою задачі і зробленими застереженнями зрозуміло, що три важки будуть опускатися вниз. Тому координатну вісь  $OY$  доцільно спрямувати так само вниз.

3. Запишемо рівняння руху у векторній формі для всієї системи тіл:

$$M\bar{a} = 3m\bar{g} + \bar{T}_1 + \bar{T}_2 + 2m\bar{g}, \text{ де } M = 5m.$$

4. Спроекуємо на вісь  $OY$  сили з урахуванням напрямку їхньої дії:

$$5ma = 3mg - T_1 + T_2 - 2mg.$$

Відповідно до умови задачі та обумовлених нами застережень сили натягу ниток  $T_1$  і  $T_2$  однакові, і тому

$$5ma = 3mg - 2mg = mg.$$

Звідси знаходимо прискорення руху системи:

$$a = \frac{mg}{5m} = \frac{g}{5}.$$

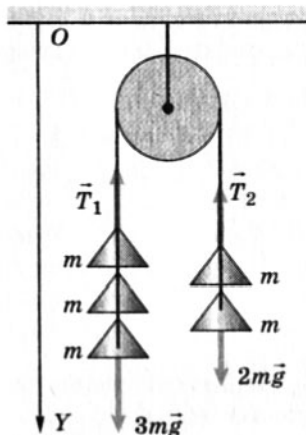
5. У разі рівноприскореного руху шлях, який проходить тіло, становить  $l = v_0\Delta t + \frac{a\Delta t^2}{2}$ . Врахувавши, що в момент початку руху важків їх швидкість дорівнює нулю ( $v_0 = 0$ ), рівняння набуває вигляду  $l = \frac{a\Delta t^2}{2}$ . Маючи на увазі, що  $\Delta t = 1$  с, а прискорення  $a = \frac{g}{5}$ , знаходимо шлях, який проходить кожний з важків за першу секунду руху:  $l = 1$  м (якщо вважати  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>).

6–7. Цю задачу можна розв'язати й іншим способом. Запишемо систему скалярних рівнянь окремо для лівих і правих важків:

$$\begin{cases} 3ma = 3mg - T, \\ 2ma = T - 2mg. \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи додаванням рівнянь дає те саме значення прискорення руху важків:  $a = \frac{g}{5}$ .

$$\text{Відповідь: } a = \frac{g}{5}.$$



Мал. 2.28. Рух зв'язаних важків

### III. Гальмування автомобіля

**Задача 3.** Водій вимкнув двигун автомобіля і почав гальмувати на горизонтальній дорозі при швидкості 72 км/год.

Визначити шлях, що проїхав автомобіль за 20 с, якщо коефіцієнт тертя під час гальмування дорівнює 0,2.

Дано:

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

$$t = 20 \text{ с},$$

$$\mu = 0,2,$$

$$v = 0.$$

$l = ?$

Розв'язання

1–2. На горизонтальній дорозі на автомобіль діє сила тяжіння  $m\vec{g}$ , спрямована вертикально вниз, і сила реакції дороги  $\vec{N}$ , спрямована вертикально вгору. Якщо двигун вимкнено, то на автомобіль діє лише сила тертя  $\vec{F}_{\text{тер}}$ , напрям якої протилежний до напрямку швидкості руху. Зробимо малюнок (мал. 2.29).

3. Другий закон динаміки у векторній формі

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тер}}.$$

4. Запишемо рівняння в проекціях на координатні осі:

$$\text{на вісь } OX: ma = F_{\text{тер}},$$

$$\text{на вісь } OY: 0 = N - mg.$$

Сила тертя  $F_{\text{тер}} = \mu N$ . Знайдемо значення прискорення  $a$ , з яким рухався автомобіль, з урахуванням сили тертя:  $a = \mu g$ .

Напрямок прискорення протилежний до напрямку швидкості, тоді рівняння для визначення шляху автомобіля

$$l = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

5. Визначимо шлях автомобіля за 20 с (за умовою задачі):

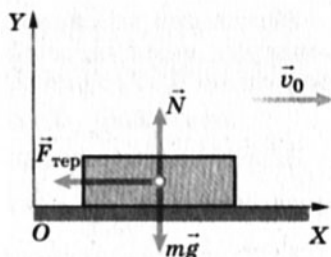
$$l = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 20 \text{ с} - 0,2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{400}{2} \text{ с}^2 = 0.$$

6. Але такий результат неможливий. Адже автомобіль не міг зупинитися миттєво в момент початку гальмування. Треба шукати помилку.

Скористаємося кінематичними рівняннями для швидкості та визначимо час руху автомобіля до його зупинки:

$$v = v_0 - at; \quad 0 = v_0 - at; \quad t = \frac{v_0}{a}; \quad t = \frac{20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 10 \text{ с}.$$

У задачі вказано час 20 с, а автомобіль рухався під час гальмування лише 10 с. Тепер можна знайти значення гальмівного шляху:



Мал. 2.29. До розгляду гальмування автомобіля

$$l = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 10 \text{ с} - 0,2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{100}{2} \text{ с}^2 = 100 \text{ м.}$$

7. Розв'яжемо цю задачу іншим способом. Знаючи прискорення  $a$ , з яким рухався автомобіль під час гальмування до повної зупинки, пройдений ним шлях можна визначити за формулою

$$l = \frac{v^2 - v_0^2}{2a_x}.$$

Враховуючи, що  $v = 0$  і  $a_x = -a$ , дістанемо

$$l = \frac{v_0^2}{2a_x} = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \quad l = \frac{400 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 0,2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 100 \text{ м.}$$

Відповідь:  $l = 100 \text{ м.}$

#### IV. Рух тіла, кинутого горизонтально

83

**Задача 4.** Рух тіла, кинутого горизонтально з деякої висоти.

На висоті 5 м над поверхнею землі кульку кинули горизонтально зі швидкістю 10 м/с. Знайдіть положення кульки через кожні 0,1 с і за одержаними даними побудуйте траєкторію руху кульки до її падіння на землю. Через який час кулька впаде на землю? Яку швидкість матиме кулька у момент падіння на землю? Яку відстань подолає кулька у горизонтальному напрямі, який пройде шлях та яке здійснить переміщення від початку руху до моменту падіння?

Для спрощення обчислень прискорення вільного падіння взяти рівним  $10 \text{ м/с}^2$ . Опором повітря знехтувати.

#### Розв'язання

Цей рух можна розкласти на два незалежні рухи: рівномірний і прямолінійний, що відбувається в горизонтальному напрямі зі швидкістю кидання  $v_x = 10 \text{ м/с}$ , і вільне падіння з висоти  $h = 5 \text{ м}$  з прискоренням  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Для опису руху виберемо прямокутну систему координат  $ХОУ$ : спрямуємо вісь  $ОХ$  у горизонтальному напрямі, а вісь  $ОУ$  вертикально вниз (мал. 2.30). Зрозуміло, що напрями обидва можна було б обрати й інакше.

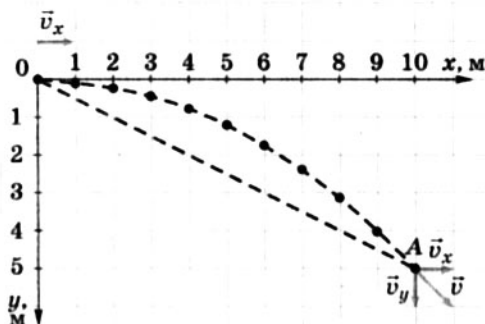
Тоді рівняння руху кульки по координатних осях будуть:

$$x = v_x t; \quad y = \frac{gt^2}{2}.$$

Швидкість тіла у будь-якій точці траєкторії  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ , де  $v_x$  залишається під час руху сталою, а  $v_y = gt$ .

Для побудови траєкторії руху кульки знаходимо її координати через кожні 0,1 с. Дані заносимо до таблиці й на малюнок і за ними будемо траєкторію.

$t, \text{с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$x, \text{м}$	0	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,0
$y, \text{м}$	0	0,05	0,20	0,45	0,80	1,25	1,80	2,45	3,20	4,05	5,00



Мал. 2.30. Траєкторія тіла, кинутого горизонтально

З виконаних розрахунків та побудованої траєкторії видно, що кулька впаде на землю через 1 с після кидання. У момент падіння горизонтальна складова швидкості  $v_x = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а верти-

кальна  $v_y = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 1,0 \text{ с} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Оскільки результуюча швидкість  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ , то  $v = 10\sqrt{2} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

У горизонтальному напрямі кулька подолає відстань 10 м.

Шлях, який пройде кулька за час руху, можна визначити як довжину траєкторії: за допомогою нитки чи дротинки, покладених на траєкторію, і масштабної лінійки; за допомогою курвиметра – приладу для вимірювання довжини кривих ліній чи будь-яким іншим способом, який ви запропонуєте. Значення переміщення вимірюємо масштабною лінійкою: за нашими даними це близько 11,2 м.

Крива, по якій рухалася кулька, називається гілкою параболи.

### Вправа 13

1. Лижник масою 50 кг після спуску з гірки проїхав по горизонтальній частині траси до повної зупинки 20 м за 10 с. Чому дорівнює коефіцієнт тертя лиж по снігу?

2. Яким має бути радіус колової орбіти штучного супутника Землі, щоб він увесь час перебував над однією і тією самою точкою земної поверхні на екваторі?

### V. Важки на блоці

**Задача 5.** Через невагомий блок перекинута нитка з важками, маси яких дорівнюють  $m_1$  і  $m_2$ . Визначити різницю сил, що діють на вісь блока, коли він закріплений жорстко і коли вільно обертається. Вважати, що нитка невагома, нерозтяжна і не ковзає на блоці.

Дано:

$m_1, m_2$ .

$(F_1 - F_2) - ?$

Розв'язання

1. Коли блок закріплений жорстко і він не може обертатися, а нитка не ковзає по ньому (за умовою), то на вісь блока діє сила

$$\vec{F}_1 = \vec{T}_1 + \vec{T}_2 = m_1\vec{g} + m_2\vec{g} = (m_1 + m_2)\vec{g}.$$

Якщо блок вільно обертається, натяг нитки з обох боків однаковий і дорівнює  $T$ . У цьому разі на вісь блока діє сила  $F_2 = 2T$ .

2. Виконаємо малюнок. Спрямуємо вісь  $OY$  вертикально вниз, передбачивши, що в цьому напрямі буде рухатися тіло  $m_1$ , якщо його маса більша за  $m_2$  (мал. 2.31).

3. Запишемо другий закон механіки Ньютона для обох тіл у векторній формі для випадку, коли блок вільно обертається:

$$\begin{cases} m_1\vec{a} = m_1\vec{g} + \vec{T}, \\ m_2\vec{a} = m_2\vec{g} + \vec{T}. \end{cases}$$

4. У проекціях на вісь  $OY$  система рівнянь матиме вигляд

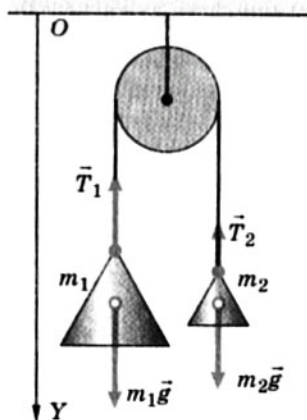
$$\begin{cases} m_1 a = m_1 g - T, & (1) \\ -m_2 a = m_2 g - T. & (2) \end{cases}$$

5. Розв'язавши систему рівнянь, знаходимо прискорення тіл:

$$a = g \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}.$$

З рівняння (1) можна знайти силу натягу:

$$T = m_1 g \left( 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$$



Мал. 2.31. До визначення сил, що діють на вісь блока

$$F_1 - F_2 = \frac{m_1^2 + m_2^2}{m_1 + m_2} g.$$

6. Силу натягу  $T$  можна знайти також з рівняння (2):

$$T = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$$

Результат буде однаковим.

## VI. Рух по колу

Особливістю динамічного рівняння руху тіла по колу є те, що прикладені до тіла сили можуть викликати як зміну напрямку швидкості, так і зміну її значення. У шкільному курсі фізики, як правило, розглядається випадок рівномірного обертання, тобто коли рівнодійна сил надає тілу доцентрового прискорення. Проте, починаючи розв'язувати будь-яку задачу, не завадить зайвий раз переконатися, що рух тіла по колу за даних умов буде рівномірний, особливо якщо це не обумовлено умовою задачі.

86



**Особливістю динамічного рівняння руху тіла по колу є те, що прикладені до тіла сили можуть викликати як зміну напрямку швидкості, так і зміну її значення.**

Крім того, слід пам'ятати, що доцентрового прискорення надає тілу не якась особлива «доцентрова сила», а та з діючих на тіло сил, яка змінює напрям його швидкості. Наприклад, це може бути гравітаційна сила.

**Задача 6.** Автомобіль масою 1 т рухається увігнутих мостом зі швидкістю 54 км/год. Радіус кривини моста дорівнює 200 м. З якою силою тисне автомобіль на міст у точці, у якій нормаль з вертикаллю утворюють кут  $60^\circ$ ?

Дано:

$m = 1 \text{ т} = 1000 \text{ кг},$   
 $v = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с},$   
 $R = 200 \text{ м},$   
 $\alpha = 60^\circ.$

$F = ?$

Розв'язання

1–2. Безпосередньо знайти силу тиску автомобіля на міст неможливо, проте можна знайти силу реакції мосту, що діє на автомобіль. За третім законом Ньютона ці сили прикладені до різних тіл і протилежно напрямлені, але однакові між собою за значенням:  $F = N$ .

Автомобіль рухається по колу радіуса  $R$  зі сталою за значенням швидкістю  $v$ .

Прискорення автомобіля напрямлене до центра кривини мосту і дорівнює  $\frac{v^2}{R}$ . Спрямуємо координатну вісь до центра кола (мал. 2.32).

На автомобіль діють сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила пружності  $\vec{N}$  деформованого мосту, яка перпендикулярна до поверхні мосту.

3. Другий закон Ньютона для автомобіля у векторній формі матиме вигляд

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}.$$

4. Запишемо рівняння в проекціях на обрану вісь  $OX$ :

$$ma = -mg \cos \alpha + N.$$

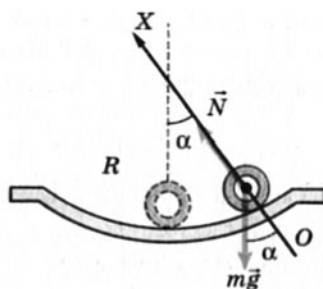
5. Знайдемо силу реакції  $N$ :

$$N = ma + mg \cos \alpha = m \left( \frac{v^2}{R} + g \cos \alpha \right).$$

Якщо вважати  $g = 10 \text{ м/с}^2$ , то  $N = 61\,250 \text{ Н}$ ,  $F \approx 60 \text{ кН}$ .

6. Аналіз результату розв'язку задачі в загальному вигляді показує, що в різних точках автомобіль тисне на поверхню мосту по-різному: сила тиску має найбільше значення в точці, коли  $\alpha = 0$  і  $\cos \alpha = 1$ , тобто в найнижчій точці:

$$F = N = m \left( \frac{v^2}{R} + g \right).$$



Мал. 2.32. Рух тіла по увігнутому мосту

## Вправа 14

1. Тіло масою 2 кг тягнуть гладенькою горизонтальною поверхнею за допомогою пружини, яка лежить горизонтально і під час руху видовжилася на 1 см. Жорсткість пружини 100 Н/м. З яким прискоренням рухається тіло?

2. Автомобіль масою 1000 кг під час гальмування зупиняється за 5 с під дією постійної сили, проходячи при цьому відстань 25 м. З яким прискоренням рухається автомобіль? Яка початкова швидкість автомобіля? Чому дорівнює сила тертя?

3. До нитки, перекинutoї через блок, прикріплено важки однакової маси (мал. 2.33). З яким прискоренням рухаються важки, якщо масою блока, нитки і тертям у системі знехтувати? Який натяг нитки в точках 1 і 2? Чому дорівнює натяг у точці 4?

4. Однакові важки прикріплено до нитки, що перекинута через блок (мал. 2.34). Тертям у системі, масами блока і нитки знехтувати. З яким прискоренням рухаються важки? Який шлях проходить кожен з важків за другу секунду руху? Який натяг нитки в точці 2?

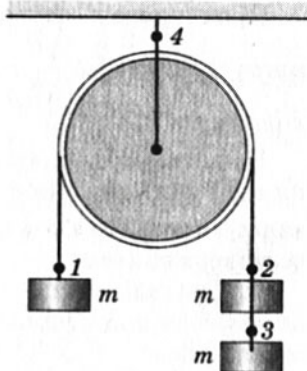
5. Під дією сталої сили 40 Н тіло рухається прямолінійно так, що залежність координати від часу описується рівнянням  $x = 5 + 2t - t^2$  (м). З яким прискоренням рухається тіло? Яка маса рухомого тіла? Яку швидкість має тіло через 3 с після початку руху?

6. Яку швидкість повинен мати автомобіль, щоб проїхати по опуклому мосту з радіусом кривини 40 м, спричинивши мінімальну дію на нього?

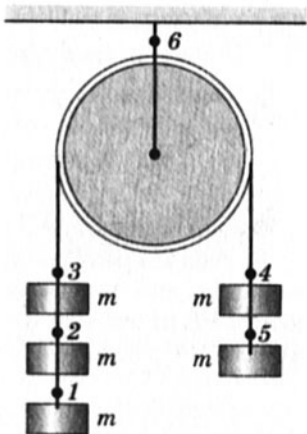
7\*. Тіло починає зісковзувати з вершини сферичної поверхні, радіус якої становить 5 м, зі швидкістю 5 м/с. З яким кутом відхилення від вершини воно відірветься від поверхні?

8\*. З якою максимальною швидкістю може їхати мотоцикліст горизонтальною дорогою, описуючи на повороті дугу радіуса 90 м, якщо коефіцієнт тертя ковзання 0,4? На який кут він повинен при цьому нахилитися?

9\*. Брусок масою 1 кг покладали на дошку масою 3 кг, яка лежить на гладенькій горизонтальній поверхні. Коефіцієнт тертя між бруском і дошкою 0,1. З яким прискоренням будуть рухатися брусок і дошка: а) якщо до бруска прикладена сила 0,5 Н; б) якщо діючу силу збільшити до 2 Н?



Мал. 2.33. До зачі 3



Мал. 2.34. До зачі 4

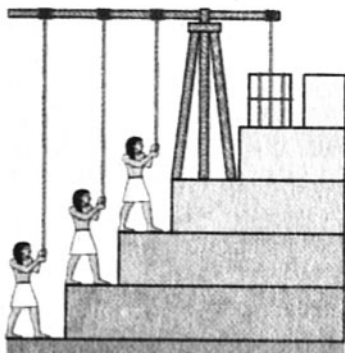
## § 23. Основи статyki. Рівновага важеля

Ще в давні часи люди, щоб виграти в силі, навчилися використовувати звичайну палицю як важіль. На малюнку 2.35, наприклад, зображено, як за допомогою важеля піднімали по сходинках на значну висоту величезні кам'яні брили, зокрема під час будівництва пірамід.



У найдавніших працях з механіки вчені Греції та Єгипту переважно розглядали питання статички – розділу механіки, в якому вивчаються умови рівноваги тіл під дією сил. Найважливіші досягнення в цьому належали Арістотелю, і саме він дав назву «механіка» науці, яка вивчає найпростіші рухи матеріальних тіл.

Учені вже тоді розуміли значення статички, що повністю підтвердилося подальшим розвитком науки, особливо техніки: дія величезної кількості механізмів, машин тощо ґрунтується на вченні про рівновагу тіл.



Мал. 2.35. Використання важеля у давнину



**Арістотель (384–322 до н. е.)** – один з найвидатніших учених Давньої Греції. У галузі фізики вивчав питання статички, розробив класифікацію механічних рухів, сформулював закон прямолінійного поширення світла, пояснював природу атмосферних явищ тощо.

89

Фундаментальні наукові основи вчення про рівновагу були закладені видатним давньогрецьким мислителем і вченим, знавцем античної техніки і винахідником Архімедом.

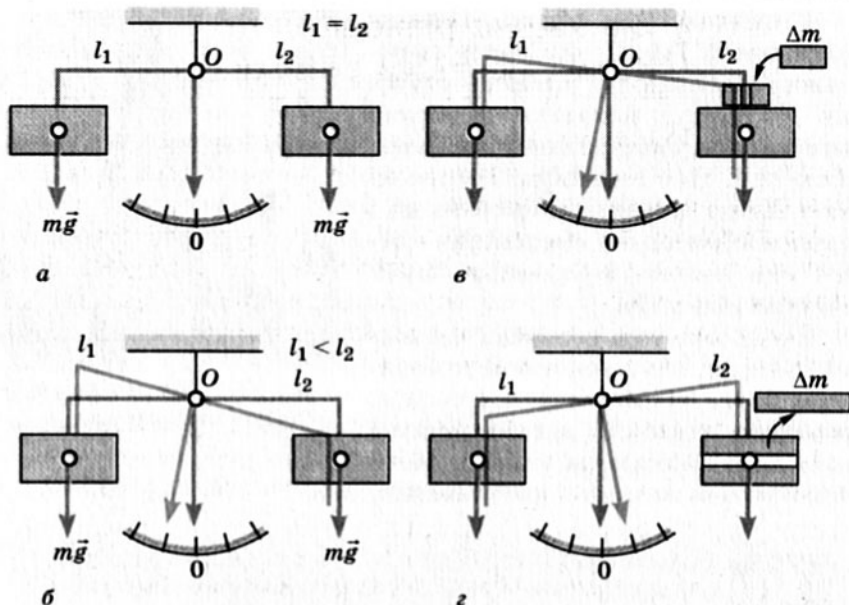


**Архімед (287–212 до н. е.)** – давньогрецький фізик, математик, винахідник, інженер. Вивчав умови рівноваги тіл, прості механізми, плавання тіл тощо. Встановив, що відношення довжини будь-якого кола до його діаметра (число  $\pi$ ) міститься між  $3\frac{1}{7}$  і  $3\frac{10}{71}$  (3,142 – 3,140); на той час це були дуже точні дані.

Саме він застосував у статисти такі найважливіші поняття, як центр тяжіння і момент сили, визначив положення центрів тяжіння для різних тіл і фігур, математично довів закони важеля, сформулював правила додавання паралельних сил.

У праці «Про рівновагу плоских фігур» Архімед подає положення (постулати), які стали фундаментом статички:

1) однакові тягарі, прикладені до однакових плечей важеля, зрівноважуються (мал. 2.36, а);



Мал. 2.36. Постулати Архімеда

2) однакові тягарі, прикладені до неоднакових плечей важеля, не перебувають у рівновазі; тягар, прикладений до довшого плеча, падає вниз (мал. 2.36, б);

3) якщо тягарі, підвішені до будь-яких плечей важеля, перебувають у рівновазі і якщо до одного з тягарів що-небудь додати, рівновага порушиться, і він падатиме вниз (мал. 2.36, в);

4) так само, якщо один тягар зменшити, то рівновага порушиться, і тоді інший тягар падатиме вниз (мал. 2.36, г).



**Важіль перебуває в рівновазі, якщо плечі сил обернено пропорційні значенням сил, що діють на нього**

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

Із цих положень Архімед зробив висновок, що будь-які тягарі перебувають у рівновазі, коли плечі важеля обернено пропорційні масам тягарців:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{m_2 g}{m_1 g} = \frac{m_2}{m_1}$$

## § 24. Умови рівноваги тіл. Стійка і нестійка рівновага

Рівновага – стан тіла, за якого в розглядуваній системі відліку відсутні переміщення будь-яких його точок під дією прикладених до нього сил.

Пригадаймо, що момент сили відносно будь-якої осі дорівнює добутку модуля сили на її плече:  $M = Fl$ . Плечем  $l$  сили називають найкоротшу відстань від осі обертання до лінії дії цієї сили (перпендикуляр, опущений з осі обертання до лінії дії сили). Момент сили вважається додатним, якщо прикладена до тіла сила намагається повернути його навколо осі за годинниковою стрілкою, і від'ємним, якщо ця дія протилежна.

Для рівноваги тіл необхідне виконання двох умов: 1) геометрична сума прикладених до тіла сил повинна дорівнювати нулю:  $\sum \vec{F}_i = 0$ ; 2) алгебраїчна сума моментів сил, прикладених до тіла відносно будь-якої нерухомої осі, повинна дорівнювати нулю:  $\sum M_i = 0$ .

91

**Момент сили:**  $M = Fl$ .

**Умови рівноваги тіл:**

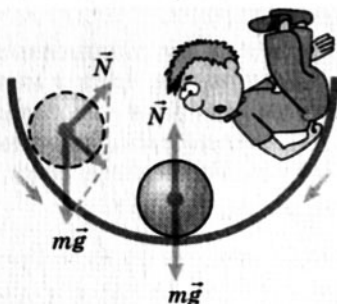
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \dots = \sum \vec{F}_i = 0; \quad M_1 + M_2 + M_3 \dots = \sum M_i = 0.$$



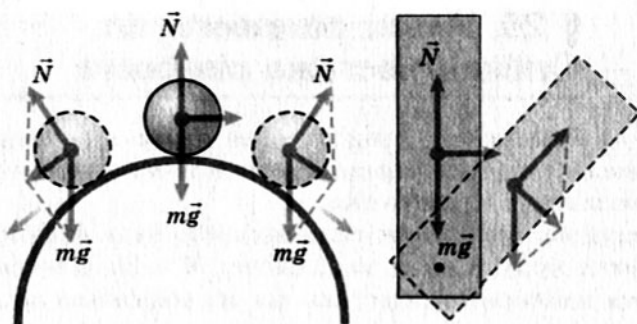
**Рівновага стійка**, якщо тіло після зміщення знову повертається в положення рівноваги (мал. 2.37).

При нестійкій рівновазі незначне зміщення тіла викликає подальше значне відхилення його від початкового положення (мал. 2.38).

**Рівновага тіла буває стійкою, нестійкою і байдужою.**

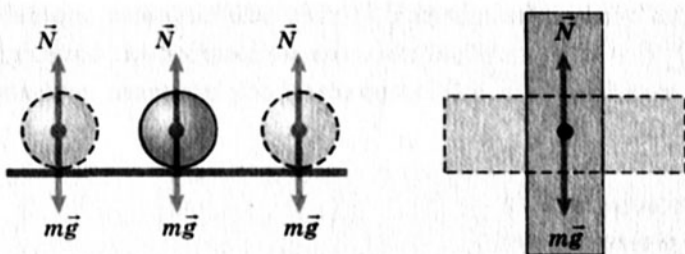


Мал. 2.37. Стійка рівновага



Мал. 2.38. Нестійка рівновага

Якщо будь-які зміщення тіла не порушують його стану рівноваги, то говорять про його **байдужу рівновагу** (мал. 2.39).



Мал. 2.39. Байдужа рівновага

### Вправа 15

1. До кінців стержня завдовжки 80 см і масою 10 кг підвісили тягарі, маси яких дорівнюють 1 кг і 10 кг. У якій точці потрібно підвісити стержень, щоб він перебував у рівновазі в горизонтальному положенні?

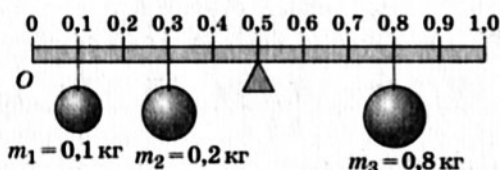
2. Балка вагою 1400 Н підвішена на двох канатах. Яка сила натягу цих канатів, якщо відстань від центра мас балки до точок підвісу 3 м і 1 м відповідно?

3. Вал вагою 25 000 Н опирається на два підшипники, відстань між якими становить 1,8 м, і виступає за один з них на 0,7 м. Посередині між підшипниками до валу прикладена сила 15 000 Н, спрямована вниз. На кінець вала, що виступає, насаджено маховик вагою 10 000 Н. Визначити сили, що діють на підшипники.

## § 25. Приклади розв'язування задач на рівновагу важеля

Розглянемо приклади розв'язування найпоширеніших задач статички. Першою розв'яжемо цікаву задачу з підручника фізики, у створенні якого брав участь Роберт Міллікен.

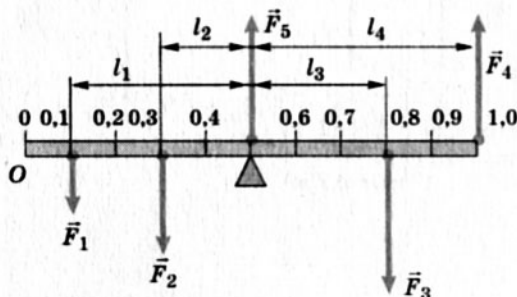
**Задача 1.** Метрова лінійка, вагою якої можна знехтувати, середньою поділкою покладена на опору і навантажена важками (мал. 2.40). Якого напрямку і з яким значенням повинна бути прикладена сила на поділці 1 м для утримання лінійки в рівновазі?



Мал. 2.40. Навантажена лінійка

### Розв'язання

Виконаємо малюнок відповідно до умови задачі (мал. 2.41), показавши діючі сили  $\vec{F}$  та їх плечі  $l$ . Лінійка під дією моментів сил може обертатися навколо нерухомої осі  $O$ , що проходить через точку  $O$ . Будемо вважати додатними всі моменти, які обертають систему за годинниковою стрілкою. У задачі це момент сили  $\vec{F}_3$ . Від'ємні моменти створюють сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ .



Мал. 2.41. Знаходження сили  $F_4$

Для спрощення обчислень вважатимемо значення прискорення вільного падіння  $10 \text{ м/с}^2$  і визначимо сили  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ :

$$F_1 = m_1 g; \quad F_1 = 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1 \text{ Н},$$

$$F_2 = m_2 g; F_2 = 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 2 \text{ Н},$$

$$F_3 = m_3 g; F_3 = 0,8 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 8 \text{ Н}.$$

Для рівноваги системи на поділці лінійки 1 м повинна бути прикладена сила  $\vec{F}_4$ , спрямована вертикально вгору. Якщо ж ми помилились у виборі напрямку дії цієї сили, то у відповіді її значення одержимо зі знаком «-». Для розв'язування задачі скористаємося другою умовою рівноваги тіла:  $\sum M_i = 0$ , тобто  $-M_1 - M_2 - M_3 - M_4 = 0$ .

$$-F_1 l_1 - F_2 l_2 + F_3 l_3 - F_4 l_4 = 0;$$

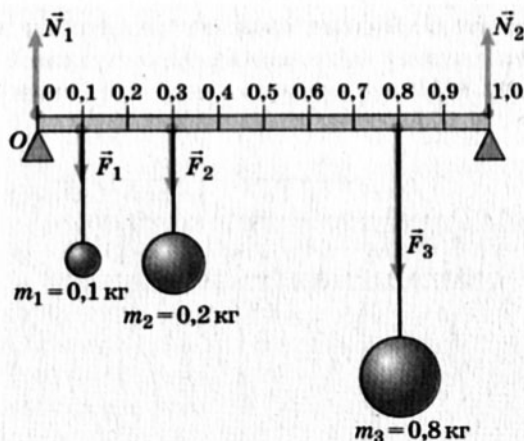
$$F_4 = \frac{F_3 l_3 - F_1 l_1 - F_2 l_2}{l_4};$$

$$F_4 = \frac{8 \text{ Н} \cdot 0,3 \text{ м} - 1 \text{ Н} \cdot 0,4 \text{ м} - 2 \text{ Н} \cdot 0,2 \text{ м}}{0,5 \text{ м}} = 3,2 \text{ Н}.$$

94

Значення сили  $F_4 = 3,2 \text{ Н}$ , тобто напрям її ми вибрали правильно.

**Задача 2.** Метрову лінійку, вагою якої можна знехтувати, покладено крайніми точками на дві опори і навантажено важками, як у попередній задачі. Потрібно визначити сили реакцій опор  $\vec{N}_1$  і  $\vec{N}_2$  (мал. 2.42).



Мал. 2.42. Визначення сил реакції опор

### Розв'язання

Щоб визначити силу реакції опори, можна скористатися таким прийомом. Якщо опору забрати, то для рівноваги системи на поділці 1 м необхідно прикласти силу, напрямлену верти-

кально вгору. Інакше система буде обертатися навколо осі, що проходить через точку  $O$  лінійки за годинниковою стрілкою. Тепер можна застосувати правило моментів:

$$F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 - N_2 l_4 = 0;$$

$$N_2 = \frac{F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3}{l_4}; N_2 = 7,1 \text{ Н.}$$

Силу реакції опори  $\vec{N}_1$  визначають аналогічно до попереднього. Тепер система буде обертатися проти годинникової стрілки навколо осі, що проходить через поділку 1 м на лінійці, тоді

$$N_1 l'_4 - F_1 l'_1 - F_2 l'_2 - F_3 l'_3 = 0;$$

$$N_1 = \frac{F_1 l'_1 + F_2 l'_2 + F_3 l'_3}{l'_4}; N_1 = 3,9 \text{ Н.}$$

Для визначення сил реакції опор можна скористатися правилом додавання паралельних сил. Цим самим правилом можна скористатися і для контролю знайдених значень.

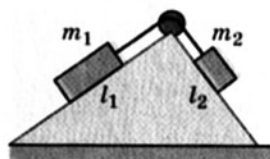
*Відповідь:*  $N_1 = 3,9 \text{ Н}; N_2 = 7,1 \text{ Н.}$

Оригінальний метод розв'язування задач статки запропоновано Симоном Стевіном (1548–1620). У книзі «Принципи рівноваги» він навів розв'язок задачі про рівновагу тіла на похилій площині і довів, що маси важків відносяться як довжини площин, що перетинаються горизонтальною лінією (мал. 2.43):

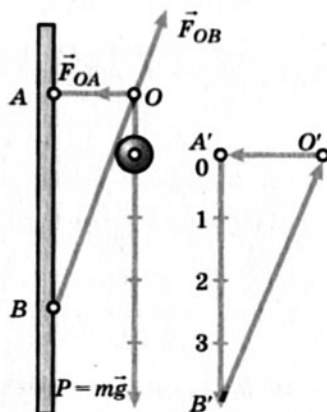
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Стевін також установив принцип додавання статичних сил (трикутник сил): *точка перебуває в рівновазі під дією трьох сил тоді, коли вони паралельні і пропорційні трьом сторонам плоского трикутника* (мал. 2.44). Наведемо приклад розв'язування однієї з відомих задач статки з використанням трикутника сил.

**Задача.** На кронштейні висить лампа вагою 4 Н. Знайти значення сил пружності, що виникають у деталях  $OA$  і  $OB$ .



Мал. 2.43. Важки на похилій площині



Мал. 2.44. Трикутник Стевіна

Дано:

$P = 4 \text{ Н}$

$F_{\text{пр}} - ?$

Розв'язання

Обираємо масштаб для побудови трикутника. Нехай 1 см на малюнку відповідає силі 1 Н.

Тепер відповідно до вказівок Стевіна будемо сторону трикутника  $A'B'$ , довжина якої відома: 4 см = 4 Н. Ця сторона трикутника паралельна напрямку дії сили тяжіння на лампу. Тепер з точки  $A'$  проводимо лінію, паралельну напрямку дії сили в деталі  $OA$ , а потім з точки  $B'$  – паралельну напрямку дії сили в деталі  $OB$ . На перетині побудованих ліній буде точка  $O'$ : одержали замкнений трикутник сил відповідно до рекомендацій Стевіна. Значучи обраний масштаб, за допомогою лінійки вимірюємо значення сили пружності в деталі  $OA$  ( $O'A'$ ) і сили реакції (також сили пружності) з боку деталі  $OB$  ( $O'B'$ ), отже, задача розв'язана.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

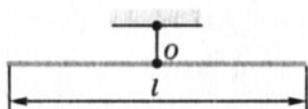
96

#### Дослідження рівноваги тіла під дією кількох сил

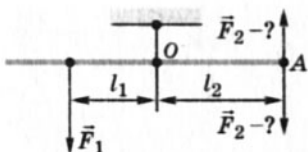
**Мета.** Набути вмінь у дослідженні реальних фізичних явищ, використовуючи теоретичний і експериментальний методи.

**Обладнання:** важіль лабораторний, підвішений на штативі; набір тягарців відомої маси; динамометр лабораторний; лінійка з міліметровими поділками.

#### Теоретичні відомості



Мал. 2.45. Ненавантажений важіль у рівновазі



Мал. 2.46. Навантажений важіль

Дослідження виконуємо з використанням однорідного важеля завдовжки  $l$ , підвішеного на штативі. Вісь обертання важеля проходить через його центр  $O$ , тому ненавантажений важіль перебуває в рівновазі (мал. 2.45).

Розглянемо навантажений важіль, до лівого плеча якого підвішено тягарець відомої маси  $m_1$  і, отже, знаємо силу  $F_1 = m_1 g$ , з якою цей тягарець притягується до Землі. Необхідно знайти силу  $F_2$ , яку потрібно прикласти до важеля в точці  $A$ , щоб він перебував у рівновазі (мал. 2.46).

Важіль перебуває в рівновазі, коли сума моментів сил, що обертають важіль відносно осі обертання проти годинникової стрілки, дорівнює сумі моментів сил, що обертають важіль за годинниковою стрілкою.



Для випадку, який ми розглядаємо,  $M_1 = M_2$ ;  $M_1 = F_1 l_1$ , де  $l_1$  – плече сили  $F_1$ , а  $F_1 = m_1 g$ ;  $M_2 = F_2 l_2$ . З рівності моментів легко теоретично розрахувати значення сили  $F_2$ . За допомогою динамометра можна виміряти силу  $F_2$  й порівняти виміряне значення з розрахованим теоретично. Дослід також покаже, чи правильно обрали напрям дії  $F_2$ .

### Виконання роботи

1. Виконати 3–5 дослідів, скориставшись одним тягарцем, змінюючи плече  $l_1$ . Результати записати в таблицю.

№	Розраховане значення сили $F_1$ , Н	Плече $l_1$ , м	Виміряне значення сили $F_2$ , Н	Плече $l_2$ , м	Напрямок дії сили (вгору, вниз)
1					
2					
3					

2. Повторити досліди з 2–3 тягарцями, комбінуючи кількість тягарців та їх розташування на важелі.

3. Зробити висновки і дати відповіді на запитання:

Розглянутий у роботі важіль зрівноважили тягарцями на Землі. Чи зміниться його рівновага при перенесенні на Місяць? А при перенесенні на космічний корабель, який рухається навколо Землі по коловій орбіті? Відповіді обґрунтуйте.

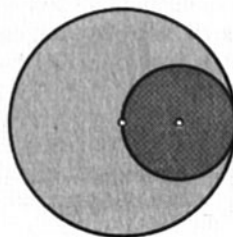
### Вправа 16

1. У середній точці натягнутого троса завдовжки 1 м прив'язано вантаж масою 10 кг. Провисання троса становить 10 см. Чому дорівнює сила натягу троса?

2. Дерев'яна балка масою  $m$  лежить на землі. Яке мінімальне вертикальне зусилля треба прикласти, щоб підняти балку за один з її кінців?

3. Троє чоловіків несуть балку. Один з них підтримує балку ззаду, а двоє інших – підклавши палицю на певній відстані від кінця. Де треба підкласти палицю, щоб усі несли балку з однаковим зусиллям?

4. Установіть, де міститься центр мас однорідної круглої пластини з вирізом (мал. 2.47). Виріжте з картону подібну фігуру і знайдену відповідь перевірте експериментально.



Мал. 2.47. До задачі 4

## § 26. Центр тяжіння (центр мас)

Будь-яке тверде тіло можна уявити як таке, що складається з безлічі матеріальних точок. У полі сил тяжіння на кожну з точок діє сила тяжіння, а на все тіло – рівнодійна цих сил.

**Центр тяжіння** – незмінно пов'язана з тілом геометрична точка, через яку проходить рівнодійна всіх сил тяжіння, що діють на дане тіло в разі його довільного розміщення в просторі.



**На кожну точку тіла в полі сил тяжіння діє сила, а на все тіло – рівнодійна цих сил. Точка прикладання рівнодійної називається центром тяжіння тіла.**

За певних умов центр тяжіння тіла збігається з положенням центра його мас.

**Центр мас (центр інерції)** – точка, що характеризує розподіл мас у тілі або системі тіл. Рухається він як матеріальна точка, де зосереджена вся маса системи і на яку діють усі прикладені до системи зовнішні сили.

**Положення центра мас тіла в однорідному полі тяжіння збігається з положенням його центра тяжіння.**

За невеликих розмірів тіл біля поверхні Землі поле сил тяжіння можна вважати однорідним, а сили, що діють на кожну точку тіла, – паралельними. Якщо дві точки перебувають на відстані 31 м, то кут між діючими на них силами тяжіння дорівнюватиме  $1'$  (одна секунда –  $1/3600$  градуса).

Щоб вага тіла не спричиняла його рух, мають бути дотримані певні умови.



**Положення центра мас тіла в однорідному полі тяжіння збігається з положенням його центра тяжіння.**

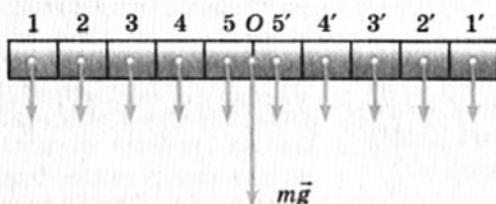
**Якщо тіло закріплене в одній точці (підвішене або підперте) і перебуває у спокої, то центр тяжіння і точка опори лежать на одній вертикалі: сила тяжіння, що діє на тіло, зрівноважується силою реакції точки опори, і тіло перебуває у спокої.**



**Якщо тіло закріплене в одній точці (підвішене або підперте) і перебуває у спокої, то центр тяжіння і точка опори лежать на одній вертикалі.**

Розглянемо приклади знаходження центра тяжіння (центра мас) тіл нескладної геометричної форми.

1. Центр тяжіння **однорідного стержня** (мал. 2.48). Розбиваємо стержень на значну кількість однакових невеликих об'ємів (у нашому випадку на п'ять зліва і справа від середини стержня). Якщо стержень однорідний, то на кожний з об'ємів діє однакова сила тяжіння. Якщо додати дві паралельні сили, що діють на об'єми 1 і 1', то їхня рівнодійна буде розміщена в точці  $O$  – середині стержня.



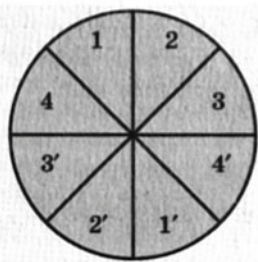
Мал. 2.48. Знаходження центра мас однорідного стержня

Аналогічно і для пар сил 2–2', 3–3' і т. д. Можна зробити висновок: **центр тяжіння однорідного стержня міститься посередині стержня (точка  $O$ ).**

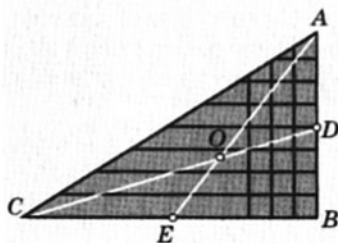
2. Скориставшись розглянутим вище прийомом, можна встановити, що **центр тяжіння однорідного круга збігається з його центром** (мал. 2.49).

Узагалі в однорідних тілах, що мають центр симетрії (прямокутна чи кругла пластинка, куля, циліндр тощо), **центр тяжіння збігається з ним**. Центр тяжіння може міститися й поза тілом, наприклад, кільця чи сірникової коробочки, м'яча чи порожньої склянки.

**Центр тяжіння однорідного стержня міститься посередині стержня.**



Мал. 2.49.  
Знаходження центра мас однорідного круга



Мал. 2.50. Знаходження центра мас однорідного трикутника



**Центр тяжіння однорідного круга збігається з його центром.**

стороні трикутника, наприклад  $AB$ . Центр тяжіння кожної такої смужки, як і однорідного стержня, міститься в її середині. Центр тяжіння всього трикутника лежить десь на медіані  $CD$ , що проходить через середини всіх відрізків, паралельних стороні  $AB$ .

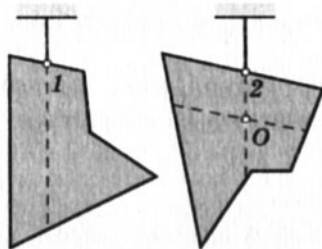


**Центр тяжіння однорідного трикутника лежить у точці перетину його медіан.**

Якщо поділити трикутник на смужки, паралельні стороні  $CB$ , то з урахуванням попередніх міркувань можна зробити висновок: центр тяжіння трикутника буде лежати на медіані  $AE$ . Таким чином центр тяжіння трикутника лежить на перетині медіан в точці  $O$ .

4. Щоб знайти центр тяжіння плоскої фігури, треба підвісити її за будь-яку її точку, наприклад  $1$ . Тоді фігура повернеться так, що центр тяжіння стане на вертикалі, яка проходить через точку підвісу (мал. 2.51). Відмітивши напрям цієї вертикалі, підвісимо фігуру за іншу точку  $2$ : вона знову повернеться так, що центр тяжіння перебуватиме на вертикалі, яка проходить через нову точку підвісу. Позначимо напрям і цієї вертикалі. Отже, він належить обом цим лініям, тобто знаходиться на їх перетині.

100



Мал. 2.51. Знаходження центра мас плоских фігур

**Центр тяжіння плоскої фігури лежить у точці перетину вертикалей, проведених через дві будь-які точки підвісу.**

У разі знаходження центра сил тяжіння складних фігур необхідно виходити з того, що сила тяжіння дорівнює сумі сил тяжіння частин тіла і завжди прикладена в центрі цих сил. Розв'язування таких задач зводиться до розгляду моментів сил відносно осі, що проходить через центр тяжіння тіла.



1. Що таке центр тяжіння тіла?
2. Що таке центр мас тіла?
3. Як знайти центр тяжіння тіл, що мають центр симетрії?

## Вправа 17

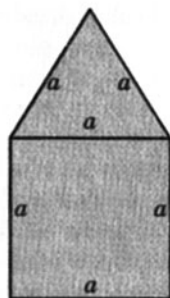
1. Знайти центр тяжіння однорідних квадрата, ромба, прямокутника, рівнобічної трапеції, плоского кільця.

2. Знайти центр тяжіння правильної призми, циліндра.

3. Плоска однорідна пластинка складається з квадрата і рівностороннього трикутника зі сторонами  $a$  (мал. 2.52). Визначити положення центра мас пластинки.

4. Однорідний стержень з дроту підвішено на нитці, прикріпленій посередині. Яка частина стержня «перетягне», якщо праву його частину зігнути вдвоє? Де буде міститися центр мас стержня?

5. Виріжте з картону фігуру довільної форми і знайдіть її центр мас.



Мал. 2.52. До зачі 3

## § 27. Закони збереження в механіці. Замкнута система

У перебігу фізичних явищ більшість фізичних величин, які їх характеризують, змінюється. Так, під час руху фізичного тіла різних значень набувають переміщення, шлях, можуть змінюватися прискорення, швидкість, сила тощо. В електричних процесах за певних умов змінюється значення електричного заряду. Разом з тим було помічено, що є низка фізичних величин, які за певних умов залишаються незмінними (зберігаються). До таких величин, зокрема, належить маса, енергія, імпульс та інші. Вони підлягають дії законів, які у фізиці називаються законами збереження. Врахування цих законів дає змогу раціонально розв'язувати багато задач і пояснити плин багатьох фізичних явищ і процесів.

Усі зміни, які спостерігають у природі, є наслідком взаємодії тіл. Інтенсивність цих взаємодій залежить не лише від їх природи, а й від відстаней між тілами та від специфічних характеристик самих тіл. За певних умов один з видів взаємодії може перевищувати за інтенсивністю інші. Так, на великих відстанях між тілами суттєвою є гравітаційна взаємодія, тоді як ядерна помітна лише у межах ядра атома. Практично в розрахунках або важко одночасно врахувати всі взаємодії, або в цьому немає потреби.


Учені розглядають деякі фізичні явища, свідомо нехтуючи певними взаємодіями. Наприклад, при розрахунках сили тертя, яка діє на колеса автомобіля, суттєвою є лише сила тяжіння, що діє на автомобіль з боку Землі, тому дією Місяця можна знехтувати.

Визначаючи рух міжпланетного корабля в межах Сонячної системи, не можна нехтувати дією на нього Сонця і планет, а от дію далеких зір можна і не враховувати.

Отже, із загальної картини природи штучно виокремлюється частина, окреслена рамками обмежень і спрощень, тобто певна система фізичних тіл, уявно ізольованих від зовнішнього середовища та об'єднаних за спільними ознаками.

**Група об'єднаних за певною спільною ознакою тіл, на які не діють інші тіла або дія яких несуттєва за даних умов, називається замкнутою (ізолюваною) системою.**

Поняття замкнутості системи – умовне і визначається завданнями, які ставляться перед дослідженням, умовами досліду, рівнем розвитку експериментального чи теоретичного методу дослідження. Якщо система з певних міркувань вважається замкнутою, то з огляду на це вона не залишається поза природою: у ній без будь-яких змін діють усі фізичні закони, зокрема закони збереження. Їх суть зумовлена однорідністю простору і часу. Адже жодній точці не можна надати перевагу перед іншими точками, зважаючи на її особливі властивості. Перебіг фізичних явищ не змінюється в разі переходу від однієї точки простору до іншої. Тому певні фізичні величини в замкнутих системах залишаються незмінними, підлягають законам збереження. У механіці такими законами є закон збереження імпульсу і закон збереження енергії (існують закони збереження й інших фізичних величин, проте в шкільному курсі фізики їх не вивчають).

- 
1. Які взаємодії існують у природі?
  2. Чи однакова інтенсивність кожної взаємодії?
  3. Що називається замкнутою системою?
  4. З якою метою вчені користуються поняттям замкнутої системи?
  5. З яких властивостей простору й часу впливають закони збереження?

## § 28. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу

Існує кілька шляхів розв'язування основної задачі механіки. Одним з них є використання законів механіки Ньютона, які були розглянуті в попередніх розділах. Проте користуватися законами Ньютона, які формулюються на основі понять сили і маси, не завжди зручно. Як приклад розглянемо дві кулі, які рухаються назустріч одна одній. За законами Ньютона кожна з них унаслідок короткочасного зіткнення на-

буває певного прискорення, яке й визначає швидкість куль після взаємодії.

Нехай пружні кулі мають маси  $m_1$  і  $m_2$ .

Рухаються вони назустріч одна одній зі швидкостями  $v_{01}$  і  $v_{02}$  (мал. 2.53). Вважатимемо, що дія інших тіл несуттєва або скомпенсована, тобто кулі утворюють замкнуту, або ізольовану, систему.

Під час зіткнення в кулях виникають сили пружності, які, згідно з третім законом механіки Ньютона, рівні за модулями і протилежні за напрямками:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

де  $\vec{F}_{12}$  – сила дії першої кулі на другу;  $\vec{F}_{21}$  – сила дії другої кулі на першу.

Отже,

$$m_2 \cdot \vec{a}_2 = -m_1 \cdot \vec{a}_1,$$

де  $\vec{a}_2$ ,  $\vec{a}_1$  – прискорення відповідно другої та першої куль.

Якщо врахувати, що за означенням  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , то отримаємо

$$m_2 \cdot \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{t_2} = -m_1 \cdot \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{t_1},$$

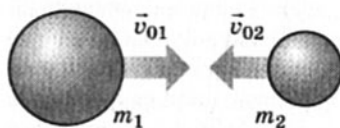
де  $\vec{v}_{01}$ ,  $\vec{v}_{02}$  – початкові швидкості відповідно першої та другої куль;  $\vec{v}_1$ ,  $\vec{v}_2$  – швидкості відповідно першої та другої куль після взаємодії (мал. 2.54);  $t_1$ ,  $t_2$  – час взаємодії кожної з куль.

Оскільки час взаємодії обох куль однаковий ( $t_2 = t_1$ ), то

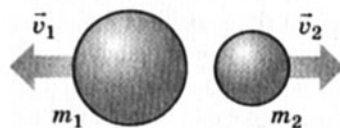
$$m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02} = -(m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01}), \text{ або } m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}.$$

У лівій і правій частинах рівняння сумуються добутки маси тіла на його швидкість.

Як відомо, ця фізична величина називається імпульсом тіла або кількістю руху.



Мал. 2.53. Дві кулі рухаються назустріч одна одній



Мал. 2.54. Огляд з випадків руху двох куль після взаємодії

**Імпульс** – характеристика механічного руху, що дорівнює добутку маси тіла  $m$  на його швидкість  $v$ :  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Імпульс – величина векторна, напрямлена так само, як і швидкість тіла.



Отже, якщо два тіла взаємодіють лише одне з одним, то сума їхніх імпульсів до взаємодії і після взаємодії залишається однаковою.

Це твердження поширюється і на систему з довільною кількістю взаємодіючих тіл, тому можна дати загальне формулювання закону збереження імпульсу:

**у замкнутій (ізолюваній) системі сума імпульсів тіл за будь-яких взаємодій між ними залишається незмінною.**

Закон збереження імпульсу – один з основних законів природи. За цим законом у замкнутій (ізолюваній) системі векторна сума імпульсів усіх тіл залишається незмінною. Тіла такої системи (наприклад, у Сонячній системі) можуть обмінюватися імпульсами, але сумарний імпульс у системі залишиться таким самим. Це положення справджується для всіх явищ природи.

104

1. Чому для розрахунків взаємодії тіл не завжди зручно користуватися законами механіки Ньютона?
2. Як розрахувати імпульс тіла?
3. Які одиниці вимірювання імпульсу тіла?
4. Як формулюється закон збереження імпульсу?

## Вправа 18

1. Який імпульс кулі масою 5,6 г, що летить зі швидкістю 900 м/с?

2. З гармати стріляють у горизонтальному напрямі. Визначити імпульс снаряда, якщо його маса становить 65 кг, а швидкість у момент вильоту 600 м/с.

3. Людина масою 70 кг біжить зі швидкістю 7 м/с, наздоганяє візок масою 30 кг, що рухається зі швидкістю 2 м/с, і стрибає на нього. З якою швидкістю рухатиметься візок після цього?

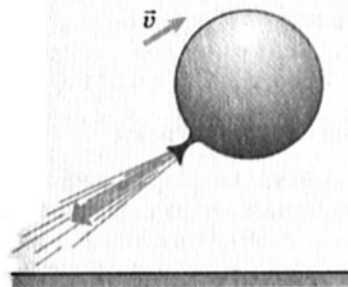
4. Якої швидкості відносно води набуде нерухомий човен, маса якого з вантажем становить 200 кг, якщо пасажир, що сидить у човні, зробить постріл у напрямі корми? Маса кулі дорівнює 10 г, а її початкова швидкість 800 м/с.

## § 29. Реактивний рух

Ми вже знаємо, що тіла утворюють замкнуту систему, якщо вони взаємодіють лише одне з одним. Не змінюючи механічного стану системи в цілому, така взаємодія може спричинити зміну механічного стану лише тіл, які її утворюють.



Як приклад розглянемо гумову кульку з газом, що лежить на столі. Її можна вважати замкнутою системою, оскільки сила тяжіння, сила Архімеда і сила реакції стола взаємно компенсуються. Хоча газ і кулька взаємодіють між собою, механічний стан системи, яку вони утворюють, не змінюється. Якщо у кульці зробити отвір, через який газ виходитиме назовні, вона почне рухатися в напрямі, протилежному до напрямку витікання газу (мал. 2.55). Зміна стану однієї частини системи спричинить зміну стану другої її частини.



Мал. 2.55. З гумової кульки виходить газ

Подібне можна спостерігати й тоді, коли з нерухомого човна, який плаває на воді, кинути будь-який предмет значної маси у напрямі корми. Човен зміститься в протилежному напрямі.

Рух гумової кульки, з якої виходить газ, і рух човна, з якого викидають предмет, відбувається внаслідок відділення від системи певної маси з деякою швидкістю.

**Рух, який відбувається внаслідок відділення частини системи з**

**деякою швидкістю, називають реактивним.**

Багато прикладів реактивного руху можна знайти в природі.

Так, кальмар, набравши воду в свою мантийну порожнину і різким скороченням м'язів викинувши її назовні, набуває деякої швидкості (мал. 2.56).

Серед рослин відомий так званий «скажений» огірок. Коли він досягає, частина його насіння вилітає з плоду назовні в один бік, а оболонка відлітає в інший, поширюючи насіння подалі від рослини (мал. 2.57).



Мал. 2.56. Рух кальмара



Мал. 2.57. «Скажений» огірок

Людина опанувала принцип реактивного руху і застосовує його для своїх практичних потреб, будуючи реактивні літальні апарати – ракети і літаки.

Основна частина ракети – реактивний двигун, який має камеру згоряння й сопло – отвір, через який виходять гази, що утворилися під час згоряння палива (мал. 2.58).



Мал. 2.58. Схема реактивного двигуна на рідкому паливі

Якщо двигун працює на рідкому паливі, то спеціальні насоси одночасно подають з баків, розміщених на ракеті, паливо й окиснювач у камеру згоряння (мал. 2.59), унаслідок чого відбувається швидке згоряння палива і викидання газів через сопло.

Можливе розміщення твердого палива з окиснювачем безпосередньо в камері згоряння (мал. 2.60).

При згорянні палива утворюється розжарений газ, який чинить тиск на стінки і дно камери. У місці, де камера згоряння



Мал. 2.59. Такий вигляд має рідкий реактивний двигун сучасної балістичної ракети



Мал. 2.60. Ракетний двигун на твердому паливі

переходить у сопло, цей тиск на камеру відсутній. Нескомпенсована сила тиску на дно камери згоряння і є реактивною силою тяги двигуна, яка змінює імпульс ракети. Тиск газів на бічні стінки камери згоряння взаємно компенсується і не змінює імпульсу ракети.

Чим довше працює двигун, тим більшої зміни набуває імпульс ракети – швидкість ракети зростає.

Виміряти силу тиску газів на дно камери згоряння з багатьох причин дуже складно, тому рух ракети, як правило, розраховують на основі закону збереження імпульсу, а не законів механіки Ньютона.

Якщо ракету з паливом вважати замкнутою системою, то її початковий імпульс дорівнюватиме нулю. Як тільки починає працювати двигун, розжарені гази, вилітаючи з сопла, набувають певного імпульсу  $m_r v_r$ , а ракета – імпульсу  $m_p v_p$ .

Розрахунки на основі закону збереження імпульсу показують, що збільшити швидкість ракети можна, збільшивши масу палива або швидкість витікання газів, оскільки  $v_p = \frac{m_r v_r}{m_p}$ .

Техніка, побудована на принципі реактивного руху, дуже широко використовується в сучасному житті. Багато видів цивільної транспортної техніки, військова та космічна техніка побудовані на застосуванні принципу реактивного руху.

Значний внесок у розвиток реактивної техніки зробили українські вчені та інженери, серед яких варто назвати генерала російської царської армії за походженням з України О. Д. Засядька, винахідника М. І. Кибальчича, академіка В. П. Глушка та інших. Україна належить до країн, що створюють сучасну ракетну техніку. Так, на «Південмаші» у Дніпропетровську виготовляють ракети «Зеніт», за допомогою яких виводять на навколосемну орбіту штучні супутники різного призначення.

1. Який рух називають реактивним?
2. Чому рухається ракета?
3. Як можна збільшити швидкість руху ракети?



## Вправа 19

1. Яку швидкість відносно ракетниці матиме ракета масою 600 г, якщо гази масою 15 г вилітають з неї зі швидкістю 800 м/с?

2. Сигнальна ракета масою 0,25 кг (разом з порохом) злітає на висоту 125 м. Вважаючи, що порох масою 50 г згоряє миттєво, обчислити швидкість витікання газів.

3\*. У повітряно-реактивний двигун літака входить щосекунди в середньому 25 кг повітря й палива. Швидкість газів на виході двигуна становить 250 м/с, а на виході 500 м/с. Визначити силу тяги двигуна.

4\*. У ракеті, загальна маса якої становить 600 г, є 350 г вибухової речовини. На яку висоту підніметься ракета, якщо вся вибухова речовина згоряє миттєво і вилітає зі швидкістю 300 м/с? Опір повітря в шість разів зменшує теоретично розраховану висоту підйому.

## § 30. Освоєння космосу

Світовий простір, який оточує Землю, називають космосом. У повсякденному житті під цим поняттям розуміють простір поза межами земної атмосфери. Космос з давніх-давен привертав до себе увагу людей, які спочатку прагнули лише злетіти в повітря, щоб оглянути Землю з висоти пташиного польоту. Коли ж люди спромоглися літати в повітрі та їхня мрія збулася, то виникло бажання здійснити політ за межі атмосфери, у космос. Він приваблював не лише своєю загадковістю, а й новими можливостями для продуктивної діяльності людини.

Першим, хто оцінив можливості реактивних двигунів для польотів у космос, був російський учений К. Е. Ціолковський, який у 1903 р. описав свої міркування щодо цього і зробив відповідні розрахунки у праці «Дослідження космічних просторів реактивними приладами».

Згодом наш співвітчизник Ю. В. Кондратюк (О. Г. Шаргей) розробив свою теорію економного космічного польоту і принципові схеми необхідних для цього космічних апаратів, стійких і керованих у польоті. Праці К. Е. Ціолковського і Ю. В. Кондратюка започаткували космічні програми в США, КНР, СРСР та інших країнах світу. Значний внесок у розробку космічних апаратів зробили вчені С. П. Корольов, М. К. Янгель, В. Браун та інші. Завдяки їхній натхненній праці у ХХ ст. почалася космічна ера в житті людини. Так, 4 жовтня 1957 р. у СРСР було запущено перший штучний супутник Землі. 12 квітня 1961 р. радянський громадянин Юрій Гагарін став першим в історії людства пілотом космічного корабля «Восток».

Одним з визначних досягнень у завоюванні й освоєнні космосу став політ американського космічного корабля «Аполлон», який дав можливість астронавту Нілу Армстронгу в 1969 р. здійснити першу прогулянку поверхнею Місяця (мал. 2.61). «Аполлон» рухався за траєкторією, розрахованою свого часу Ю. В. Кондратюком.

У 1997 р. здійснив політ у космос громадянин незалежної України Леонід Каденюк, який провів серію наукових експериментів на американському космічному кораблі «Шаттл» (мал. 2.62).

Розвиток і вдосконалення ракетної техніки визначили основні напрями освоєння космосу.

### 1. Запуски штучних супутників Землі на геостаціонарні орбіти.

У наш час у навколоземному просторі літають сотні штучних супутників, які є складними апаратами, що виконують різноманітні функції: ретранслюють телевізійні програми, охоплюючи значні за розмірами райони Землі; забезпечують всесвітній телефонний і комп'ютерний зв'язок; використовуються як маяки для морських і повітряних суден, точно визначаючи їхні координати; здійснюють наукові програми дослідження Землі; використовуються у системі національної безпеки великих держав. Є навіть супутники для підтримання аматорського радіозв'язку. Україна як повноправний член міжнародного космічного клубу також планує запуск власного супутника зв'язку, який буде забезпечувати потреби її громадян.

### 2. Створення пілотованих космічних станцій.

Жоден технічний апарат чи прилад у багатьох випадках не може повністю замінити людину. Лише людина з її аналітичним мисленням може правильно оцінити результати досліджень. Тому для вивчення космосу свого часу були започатковані програми створення орбітальних космічних станцій, на яких дослідники можуть працювати в належних умовах, необхідних для життя людини та її активної наукової діяльності. За останні 30 років на навколоземній орбіті працювали три такі станції: «Салют», «Скайлеб», «Мир». Донині на навколоземній орбіті функціонує міжнародна орбітальна станція, на борту якої вчені проводять численні експерименти (мал. 2.63). Для доправлення космонавтів на цю станцію використовуються російські космічні одноразові кораблі типу «Союз» та американські багаторазові космічні апарати типу «Шаттл».



Мал. 2.61. Людина вперше на Місяці



Мал. 2.62. Космічний корабель багаторазового використання «Шаттл»



Мал. 2.63. Міжнародна космічна станція

### 3. Дослідження далекого космосу і планет Сонячної системи.


Космічні апарати побували на Місяці, Венері, Марсі (мал. 2.64), долетіли навіть до далеких Юпітера і Сатурна і передали на Землю відомості про природу цих планет.

Значні досягнення в дослідженні Місяця зроблено завдяки пілотованим польотам за космічною програмою США «Аполлон», під час виконання якої астронавти неодноразово відвідували місячну поверхню і виконували різні дослідження.

110



Мал. 2.64. Космічна лабораторія на поверхні Марса

- 
1. Для чого досліджують космос?
  2. Чому для польотів у космос застосовують лише апарати з реактивними двигунами?
  3. Які українські вчені зробили значний внесок у дослідження та освоєння космосу?
  4. Назвіть прізвища визначних космонавтів та астронавтів.
  5. Які головні напрями дослідження космосу?

## § 31. Механічна робота і потужність

З курсу фізики 8-го класу відомо, що під час руху тіла під дією певної сили виконується механічна робота. Коли сила і переміщення лежать на одній прямій, цю фізичну величину розраховують за формулою

$$A = Fs,$$

де  $F$  – значення сили, що діє на тіло;  $s$  – модуль переміщення тіла.

У загальному випадку, коли вони не збігаються, тобто утворюють певний кут, необхідно врахувати напрями сили і переміщення.

Так, якщо переміщення відбувається вздовж відрізка прямої  $M_0M_1$  під дією сили  $F$ , яка спрямована під кутом  $\alpha$  до неї (мал. 2.65), то робота

$$A = |\vec{F}_1| \cdot |\vec{s}| = Fscos\alpha.$$

Робота – величина скалярна. Величина  $Fscos\alpha$  є проекцією діючої сили на напрям переміщення.

Легко помітити, що коли  $\alpha < 90^\circ$ , робота додатна, при  $\alpha = 90^\circ$  (сила перпендикулярна до напрямку переміщення) робота дорівнює нулю, а при  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  вона від'ємна.

**Задача 1.** Дівчинка тягне санчата рівномірно, прикладаючи до мотузки силу 50 Н. Мотузка натягується під кутом  $30^\circ$  до горизонту (мал. 2.66). Яку роботу виконає дівчинка, перемістивши санчата на 20 м?

Дано:

$$F = 50 \text{ Н}, s = 20 \text{ м}, A = Fscos\alpha;$$

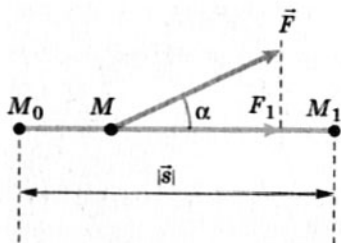
$$\alpha = 30^\circ.$$

$A = ?$

Розв'язання

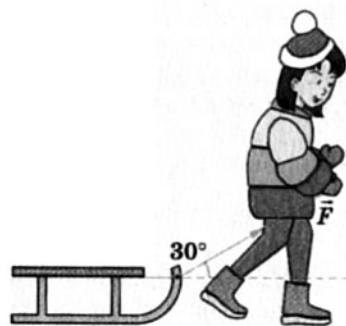
$$A = 50 \text{ Н} \cdot 20 \text{ м} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 870 \text{ Дж}.$$

**Відповідь:**  $A = 870$  Дж (робота сили додатна, оскільки  $\cos 30^\circ > 0$ ).

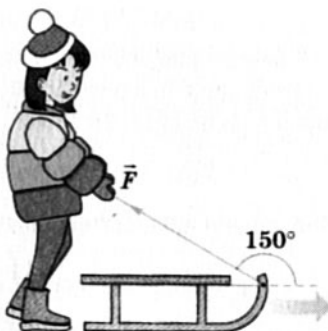


Мал. 2.65. До розрахунку роботи

У загальному випадку  $A = Fscos\alpha$ .



Мал. 2.66. До задачі 1



Мал. 2.67. До задачі 2

**Задача 2.** Розв'яжемо попередню задачу для випадку, коли дівчинка утримує санчата, які з'їхали з гори вниз і мають певну швидкість (мал. 2.67). У цьому разі  $\alpha = 150^\circ$ .

Дано:	Розв'язання
$F = 50 \text{ Н}, s = 20 \text{ м},$	$A = F \cos \alpha;$
$\alpha = 150^\circ.$	$A = 50 \text{ Н} \cdot 20 \text{ м} \cdot (-0,87) \approx -870 \text{ Дж}.$
$A = ?$	

**Відповідь:**  $A = -870 \text{ Дж}$  (робота сили від'ємна, оскільки  $\cos 150^\circ < 0$ ).

Таким чином, залежно від напрямку дії сили відносно переміщення механічна робота набуває додатних або від'ємних значень.

Наприклад, робота, яку виконує двигун автомобіля, буде додатною, оскільки сила тяги автомобіля спрямована в напрямі переміщення автомобіля. Сили тертя, що діють на автомобіль, виконують від'ємну роботу, оскільки діють у протилежному до переміщення напрямі.

112

Можливий випадок, коли робота дорівнює нулю, хоча переміщення тіла відбулося. Це буде, якщо  $\alpha = 90^\circ$ , оскільки  $\cos 90^\circ = 0$ . Наприклад, сила тяжіння, яка діє на супутник Землі, що рухається по коловій орбіті, роботи не виконує.

**Потужність** – це фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи. Оскільки при виконанні роботи відбувається перетворення енергії, то можна зробити висновок, що потужність показує швидкість перетворення одного виду енергії в інший.

У механіці потужність позначають буквою  $N$  і розраховують за формулою

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\Delta E}{t},$$

де  $\Delta E$  – зміна енергії;  $t$  – інтервал часу.

Якщо відомі потужність і час, за який виконується робота, то можна розрахувати і саму роботу:

$$A = Nt.$$

Основною одиницею потужності є 1 ват:

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$$



1. Коли виконується робота?
2. Які ви знаєте одиниці роботи?
3. Наведіть приклади, коли робота має додатне або від'ємне значення.



### Вправа 20

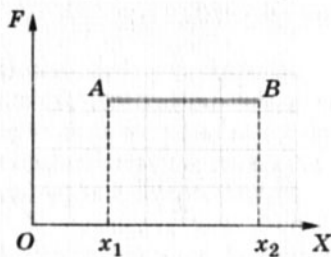
1. Тіло під дією сили 10 Н переміщується в напрямі дії сили на відстань 20 м. Яке значення виконаної роботи?

2. Робітник рівномірно пересуває багров пліт по воді, прикладаючи до багра силу 200 Н. Яку роботу виконає робітник, перемістивши пліт на 20 м, якщо кут між напрямом сили і напрямом переміщення становить  $45^\circ$ ?

3. Робітник штовхає вагонетку так, що вона рухається рівноприскорено. Чи однакову роботу виконає робітник за першу й за другу половини часу переміщення вагонетки?

4\*. З глибини 5 м підіймають на поверхню води камінь об'ємом  $0,6 \text{ м}^3$ . Густина речовини каменя дорівнює  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Яку роботу виконано під час підймання каменя?

5\*. Якщо сила, яка виконує роботу, не змінюється під час переміщення тіла, то графік її залежності від координати має вигляд відрізка прямої  $AB$ , паралельної осі  $OX$  (мал. 2.68). Як довести, що робота цієї сили чисельно дорівнює площі прямокутника  $x_1ABx_2$ ?



Мал. 2.68. До задачі 5\*

## § 32. Кінетична енергія

Інколи значення механічної роботи можна розрахувати без застосування понять сили і переміщення, узявши до уваги, що робота характеризує зміну енергії тіла.

Нехай на тіло масою  $m$  діє сила  $F$ . Для зручності розглянемо випадок, коли напрям сили збігається з напрямом переміщення. У такому разі робота, яку виконає ця сила, дорівнюватиме

$$A = Fs.$$

Згідно з другим законом механіки Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Для розрахунку модуля переміщення оберемо формулу, в яку не входить час:

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

$$\text{Тоді } A = \frac{ma(v^2 - v_0^2)}{2a} = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Як відомо, вираз  $\frac{mv^2}{2}$  називається кінетичною енергією

тіла. Отже, для обчислення роботи достатньо знати зміну кінетичної енергії тіла, тобто масу тіла та його початкову і кінцеву швидкості. Такий метод зручний тим, що ним можна користуватися навіть у випадку змінної сили і траєкторії довільної форми.

**Фізична величина, що описує стан рухомого тіла і зміна якої визначає роботу, називається кінетичною енергією.**

Для вимірювання енергії, як і роботи, використовується одиниця *джоуль* (Дж), названа на честь англійського вченого Д. Джоуля.

**Тіло, яке в даній системі відліку рухається з певною швид-**

**кістю, має кінетичну енергію:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .**

114

Швидкість тіла, виміряна в різних системах відліку, матиме різні значення, тобто вона є відносною величиною. Тому кінетична енергія тіла зі сталою масою також відносна величина і в різних системах відліку має різні значення.

Розглянемо, наприклад, два залізничні вагони. Маса кожного з них дорівнює  $2 \cdot 10^4$  кг, рухаються вони в одному напрямі зі швидкостями 15 і 10 м/с відносно полотна дороги, причому перший наздоганяє другий. Їхня кінетична енергія відповідно буде:

$$E_{k1} = \frac{mv_1^2}{2} = 2,25 \cdot 10^6 \text{ Дж}; \quad E_{k2} = \frac{mv_2^2}{2} = 1 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Якщо ж систему відліку зв'язати з другим вагоном, то перший рухатиметься в цій системі зі швидкістю 5 м/с, а другий матиме швидкість  $v = 0$ . У цьому випадку

$$E_{k1} = 25 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \quad E_{k2} = 0.$$

Отже, під час розрахунків у різних інерціальних системах відліку слід враховувати те, що кінетична енергія буде різною.

## Вправа 21

1. Яку кінетичну енергію має куля масою 10 г, якщо її швидкість дорівнює 800 м/с? Яку швидкість повинен мати снаряд масою 2 кг, щоб його кінетична енергія була такою самою?

2. У скільки разів треба збільшити швидкість тіла, щоб його кінетична енергія збільшилася в 2 рази?

3. Яка маса тіла, що рухається зі швидкістю 20 м/с, якщо його кінетична енергія дорівнює 2400 Дж?

4\*. Тіло масою 2 кг вільно падає протягом 6 с. Визначити кінетичну енергію тіла наприкінці падіння.

## § 33. Потенціальна енергія

За означенням потенціальна енергія – це енергія взаємодії. Тобто потенціальну енергію мають усі взаємодіючі тіла. Для кожного виду механічної взаємодії можна розрахувати потенціальну енергію тіл з урахуванням особливостей цих взаємодій.

Найпоширенішим видом взаємодії, з яким люди зустрічаються повсякчас, є гравітаційна взаємодія, проявом якої є сила тяжіння. За певних умов ця сила може виконувати роботу. Отже, тіла, на які діє сила тяжіння, мають потенціальну енергію. З'ясуємо, як розраховувати потенціальну енергію тіл, що знаходяться в полі тяжіння.

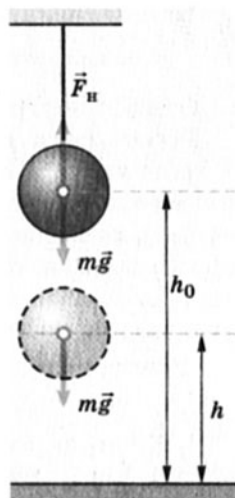
Нехай тіло масою  $m$  підвішене на висоті  $h_0$  над підлогою (мал. 2.69). На нього діють сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила натягу нитки  $\vec{F}_n$ .

Якщо перерізати нитку підвісу, то тіло почне падати вниз, оскільки на нього буде діяти лише сила тяжіння.

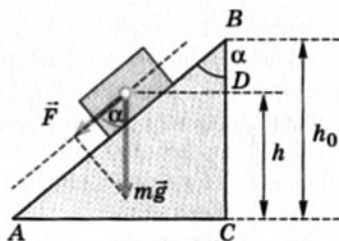
За означенням робота  $A = F \cos \alpha = mg \cos \alpha$ . Якщо врахувати, що  $s = h_0 - h$ , а  $\cos \alpha = 1$ , то  $A = mg(h_0 - h)$ . Останній вираз можна подати у вигляді  $A = mgh_0 - mgh$ . Оскільки робота дорівнює зміні енергії, можна вважати, що добуток  $mgh$  визначає потенціальну енергію тіла в полі тяжіння Землі, що перебуває на висоті  $h$  над її поверхнею.

Рух внаслідок дії сили тяжіння може відбуватися різними траєкторіями. З'ясуємо, як це буде впливати на значення роботи.

Нехай тіло масою  $m$  ковзає без тертя з точки  $B$  поверхнею похилої площини (мал. 2.70).



Мал. 2.69. Сила тяжіння може виконати роботу з переміщення кулі



Мал. 2.70. До розрахунку роботи

Якщо врахувати, що  $A = mg \cos \alpha$ ,  $s = AB$ , то з трикутника  $ABC$   $\cos \alpha = AB \cos \alpha = BC$  і разом з тим  $BD = h_0 - h$ .

Тоді робота сили тяжіння в разі ковзання тіла похилою площиною  $A = mg(h - h_0)$ .

Тобто робота сили тяжіння з переміщення тіла похилою площиною буде такою самою, як і в разі падіння з точки  $B$ , що знаходиться на висоті  $h_0$ , у точку  $D$ .

Отже, робота сили тяжіння визначається положенням точок на початку та в кінці руху і не залежить від форми траєкторії.

Для випадків, коли робота сили не залежить від форми траєкторії, а визначається початковим і кінцевим положеннями тіла, користуються поняттям потенціальної енергії.

Якщо записати формулу для роботи сили тяжіння у формі

$$A = mgh_0 - mgh, \text{ то } A = E_{п0} - E_{п} \text{ або } -(E_{п} - E_{п0}) = -\Delta E_{п}.$$

Отже, у полі сили тяжіння  $E_{п} = mgh$ .

Робота сили тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії з протилежним знаком. Це означає, що під час падіння тіла, коли сила тяжіння виконує додатну роботу, його потенціальна енергія зменшується. І навпаки, у разі руху тіла вгору, коли сила тяжіння виконує від'ємну роботу, його потенціальна енергія збільшується. Це характерно для всіх випадків, коли робота сили не залежить від форми траєкторії.

## Вправа 22

1. Хлопчик кинув м'яч масою 100 г вертикально вгору на висоту 5 м і спіймав його в точці кидання. Визначити роботу сили тяжіння під час руху м'яча вгору, вниз та на всій ділянці.

2. Висота кімнати дорівнює 3 м, висота стола – 0,75 м. Яка робота буде виконана силою тяжіння під час переміщення вантажу масою 2 кг зі стола на підлогу; до стелі; уздовж стола?

3. Тіло масою 100 г вільно падає з висоти 60 м протягом 3 с. Визначити потенціальну енергію тіла в початковий і кінцевий моменти падіння.

4. Похилою площиною завдовжки 6 м, кут нахилу якої дорівнює  $60^\circ$ , викотили вгору діжку масою 500 кг. Як змінилася потенціальна енергія діжки?

5. М'яч масою 200 г кинули вгору зі швидкістю 10 м/с. Якою буде потенціальна енергія м'яча на максимальній висоті його підймання?

6\*. Вантаж масою 100 кг висить на тросі завдовжки 8 м. Як зміниться його потенціальна енергія, якщо його відхилити горизонтально на 2 м?

## § 34. Потенціальна енергія пружно деформованого тіла

Під час розрахунків роботи сили тяжіння вважалося, що значення сили не змінюється. Розрахунок роботи сили пружності ускладнюється, оскільки значення сили пружності в процесі виконання роботи змінюється. Якщо врахувати, що сила пружності пропорційна видовженню, а тому її зміна відбувається лінійно, цих труднощів можна уникнути.

За таких умов користуються середнім значенням сили:

$$F_c = \frac{F_1 + F_2}{2},$$

де  $F_1$  і  $F_2$  – початкове і кінцеве значення сили.

Якщо врахувати, що сила пружності за законом Гука

$$F_{\text{пр}} = -kx,$$

$$\text{то } F_c = \frac{(-kx_1) + (-kx_2)}{2} = -\frac{k(x_1 + x_2)}{2}.$$

Для випадку, коли  $\alpha = 0$ , тобто сила пружності діє вздовж прямої, якою відбувається переміщення, дістанемо вираз для обчислення роботи сили пружності:

$$A = F_s = -\frac{k(x_1 + x_2)(x_2 - x_1)}{2} = -\frac{k(x_2^2 - x_1^2)}{2} = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2},$$

де  $x_1$  і  $x_2$  – видовження, що характеризують відповідно початкову і кінцеву деформації.

Повторивши міркування щодо зміни потенціальної енергії в полі сили тяжіння, можна записати:

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

**Робота сили пружності дорівнює зміні потенціальної енергії пружно деформованого тіла, взятій з протилежним знаком.**

Отже, пружно деформоване тіло має потенціальну енергію. Як і для випадку роботи сили тяжіння, робота сили пружності залежить не від форми траєкторії, а лише від початкової і кінцевої деформацій тіла.

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$



## Вправа 23

1. Дві подібні пружинки, залізна й мідна, пружно розтягнуті на однакову довжину. Під час розтягування якої з них виконана більша робота?

2. Дві подібні пружинки, залізна й мідна, пружно розтягнуті однаковими силами. Після розтягування якої з них виконана більша робота?

3. Яку роботу слід виконати, щоб стиснути пружину на 10 см, якщо для стискання її на 1 см потрібно прикласти силу 100 Н?

4. Наскільки зростає потенціальна енергія ресорної пружини, коли її стиснуто на 7 см, якщо для її стискання на 1 см потрібна сила  $3 \cdot 10^4$  Н?

## § 35. Закон збереження механічної енергії

118

Тіла можуть мати одночасно і потенціальну, і кінетичну енергії. Тіло, що падає з певної висоти, має деяку швидкість, отже, воно має кінетичну енергію. Одночасно тіло має і потенціальну енергію, оскільки на нього діє сила тяжіння і воно в певний момент часу перебуває на певній відстані від Землі. Суму потенціальної та кінетичної енергій тіла називають повною механічною енергією:  $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$ . Хоча кінетична і потенціальна енергії змінюються в процесі руху, повна енергія за певних умов залишається незмінною. Це виражає суть закону збереження і перетворення механічної енергії:

якщо в замкнутій системі діють лише сили пружності та тяжіння, то повна механічна енергія системи залишається незмінною – взаємних перетворень зазнають кінетична і потенціальна енергії:  $E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}} = E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}$ .

Закон збереження механічної енергії справджується лише тоді, коли тіла взаємодіють завдяки силам пружності та (або) тяжіння. У разі, коли в системі діє також сила тертя, повна механічна енергія зазнає змін і закон збереження механічної енергії в такому разі не діє.

Дія сили тертя спричиняє збільшення внутрішньої енергії тіл. Точні експериментальні дослідження показали, що всі «втрати» механічної енергії дорівнюють збільшенню внутрішньої енергії взаємодіючих тіл в системі. Отже, енергія в цілому не виникає з нічого і не зникає безслідно. Вона перетворюється з одного виду в інший. Це виражає суть загального закону природи – закону збереження і перетворення енергії.

Закон збереження і перетворення енергії, відкритий у 1840 р. Р. Майером, виявився справедливим для всіх явищ природи і був перевірений багатьма дослідженнями в подальшому. Жодних порушень дії цього закону вчені не виявили.

1. Як формулюється закон збереження і перетворення механічної енергії?
2. Які сили повинні діяти в системі, щоб виконувався закон збереження і перетворення механічної енергії?
3. Кого вважають відкривачем закону збереження і перетворення енергії?



## Вправа 24

1. Тіло, маса якого дорівнює 100 г, кинуте вертикально вгору зі швидкістю 40 м/с. Не користуючись законом збереження і перетворення механічної енергії, визначити кінетичну енергію тіла в початковий момент і потенціальну енергію на найбільшій висоті підймання; порівняти ці величини; визначити суму потенціальної і кінетичної енергії через 3 с від початку руху; порівняти цю суму з кінетичною енергією на початку руху; зробити висновок.

2. Тіло, кинуте вертикально вниз з висоти 75 м зі швидкістю 10 м/с, у момент удару об землю мало кінетичну енергію 1600 Дж. Визначити масу тіла і його швидкість у момент удару.

3. Якої кінетичної енергії потрібно надати тілу масою 0,5 кг, щоб воно піднялося вертикально вгору на 10 м? Опором повітря знехтувати.

4. Тіло масою 250 г кинуте вертикально вгору зі швидкістю 15 м/с. Знайти його потенціальну енергію у вищій точці траєкторії і найбільшу висоту підйому.

5. Розтягнута пружина, скорочуючись, тягне за собою прикріплене до неї тіло масою 50 г горизонтальною поверхнею без тертя. Коли деформація пружини дорівнює нулю, швидкість тіла 5 м/с. Який початковий натяг пружини, якщо її жорсткість дорівнює 10 000 Н/м?

6. У пружинному пістолеті жорсткість пружини 100 Н/м. З якою швидкістю вилетить з нього кулька масою 3 г, коли пружину було стиснуто так, що довжина її зменшилася на 10 см?

7. Тіло масою 0,1 кг, кинуте вертикально вниз з висоти 20 м зі швидкістю 10 м/с, упало на землю зі швидкістю 20 м/с. Визначити роботу сили опору повітря.

8. Який шлях пройде тіло, що рухається горизонтальною площиною зі швидкістю 20 м/с, після припинення дії сили тяги, якщо коефіцієнт тертя тіла об площину 0,1?

9\*. Лижник, спустившись із гори заввишки 12 м і завдовжки 36 м, рухається горизонтальним шляхом до повної зупинки. Визначити довжину горизонтальної ділянки шляху, якщо коефіцієнт тертя між лижами і снігом 0,05.

## Головне в розділі 2

У механіці розрізняють і досліджують сили пружності, тертя, всесвітнього тяжіння. Сила пружності виникає в разі взаємодії частинок, з яких складаються тіла (молекул, атомів, йонів). Це можуть бути сили притягання, коли відстань між частинками збільшується, або відштовхування, коли відстань між частинками зменшується.

Сила тертя є також проявом взаємодії частинок, з яких складаються тіла; вона, як і сила пружності, має електромагнітну природу. Сила тертя завжди напрямлена проти руху тіла, до якого прикладена.

120

Сила всесвітнього тяжіння є силою притягання, яка діє між усіма без винятку тілами. Вона пропорційна добутку мас взаємодіючих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .

Закони механіки Ньютона справджуються в інерціальних системах відліку.

*Перший закон динаміки:* будь-яке тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху доти, доки не спонукається прикладеними силами змінити цей стан.

*Другий закон динаміки:* прискорення, якого набуває тіло під дією сили, прямо пропорційне силі, що на нього діє, обернено пропорційне його масі і має той самий напрям, що й сила:

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

*Третій закон динаміки:* у дії завжди є однакова і протилежна протидія; сили, з якими взаємодіють тіла, завжди однакові за значенням і протилежні за напрямом.

Закони механіки Ньютона справедливі для тіл, які можна вважати матеріальними точками, а також у випадку поступального руху тіл.

Рівновага – стан тіла, за якого в розглядуваній системі відліку відсутнє переміщення будь-яких його точок під дією при-



кладених до нього сил. Рівновага буває стійкою, нестійкою і байдужою.

Для рівноваги тіл необхідне виконання двох умов:

1) геометрична сума прикладених до тіла сил повинна дорівнювати нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \sum \vec{F}_i = 0;$$

2) алгебраїчна сума моментів прикладених до тіла сил відносно будь-якої нерухомої осі повинна дорівнювати нулю:

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots = \sum M_i = 0.$$

Центр тяжіння – геометрична точка твердого тіла, через яку проходить рівнодійна всіх сил тяжіння, що діють на частинки тіла за будь-якого його положення у просторі.

Кожне рухоме тіло має імпульс:

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

і кінетичну енергію:

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

У замкнутій системі сума імпульсів тіл за будь-яких взаємодій між ними залишається незмінною (закон збереження імпульсу).

У загальному випадку механічна робота:

$$A = Fscos\alpha.$$

Вона характеризує зміну енергії тіла.

Тіла, що взаємодіють, мають потенціальну енергію, яка не залежить від форми траєкторії, за якою вони рухаються. У полі сили тяжіння:

$$E_n = mgh.$$

Повна механічна енергія замкнутої системи залишається незмінною, якщо в ній діють лише сили тяжіння або пружності; змінюються лише кінетична і потенціальна енергії (закон збереження механічної енергії):

$$E_{k1} + E_{n1} = E_{k2} + E_{n2}.$$

# Розділ 3



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

- основні положення спеціальної теорії відносності;
- формулу взаємозв'язку маси й енергії.

Ви зможете **пояснити**:

- сутність принципу відносності А. Ейнштейна;
- відносність одночасності подій в рухомій і нерухомій системах відліку.

Ви будете **здатні**:

- розв'язувати задачі, застосовуючи формулу взаємозв'язку маси й енергії.

# РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА

123

Прийнято вважати, що сучасна фізика започаткувала свій розвиток на межі XIX і XX ст. Одним з поштовхів, які сприяли її зародженню, було формування в 1905 р. видатним ученим-фізиком Альбертом Ейнштейном спеціальної теорії відносності (скорочено СТВ), яка розвинула фундаментальні поняття класичної фізики, зокрема уявлення про простір і час. Сучасна механіка побудована на засадах теорії відносності, яка пояснює явища і процеси фізичного світу на підставі єдності простору й часу. Тому її називають також релятивістською механікою.



**Ейнштейн Альберт (1879–1955)** – видатний фізик-теоретик, лауреат Нобелівської премії (1921), один із засновників сучасної фізики, творець теорії відносності. Увів поняття фотона як кванта світла, на основі квантових уявлень пояснив явище фотоелектричного ефекту, встановив формулу взаємозв'язку між масою і енергією,

розвинув молекулярно-статистичну теорію броунівського руху, запропонував квантову статистику мікрочастинок (статистика Бозе–Ейнштейна), зробив багато інших теоретичних відкриттів, передбачень та узагальнень у сучасній фізиці та астрономії. Йому належить вирішальна роль у популяризації фізичних знань і введення в науку таких нових фізичних теорій, як загальна і спеціальна теорії відносності, квантова теорія фотоелектричного ефекту, теорія розсіювання світла тощо. Активно виступав проти війни, застосування ядерної зброї.



## § 36. Основні положення спеціальної теорії відносності. Швидкість світла у вакуумі

Основою уявлень класичної фізики про простір і час було тлумачення їх як самостійних сутностей, які існують відокремлено одна від одної. Тобто вважалося, що час плине сам по собі, незалежно від особливостей перебігу фізичних явищ і процесів, що відбуваються в просторі; вибір початкового моменту та інтервалів часу є умовним, незалежним від подій, що передували їхньому перебігу. Це означало, що для всіх спостерігачів інтервали часу між одними й тими самими двома подіями однакові. Як наслідок, стверджувалося, що дві події, одночасні для одного спостерігача, з неминучістю будуть одночасними і для будь-якого іншого.

Класичні уявлення про простір визначали його як «вмістилице» всього, що існує довкола нас. За своїми властивостями він вважався однорідним (у будь-якій точці його властивості однакові) та ізотропним, тобто однаковим за всіма напрямками. Таким чином, класичні уявлення про простір і час передбачали існування абсолютного, нерухомого простору й абсолютно, незалежного від нього часу.

**Принцип відносності Г. Галілея стверджує, що закони механіки діють однаково в усіх інерціальних системах відліку.**



На підставі такого їх розуміння Г. Галілей, розглядаючи рух корабля, що пливе рівномірно й прямолінійно, не змінюючи свого руху, висловив думку, що неможливо виявити жодних змін у перебігу механічних явищ і встановити, рухається корабель чи стоїть нерухомо,

оскільки рух корабля є загальним для всього, що знаходиться на ньому, – людей, предметів, повітря. Пізніше це твердження він сформулював як **принцип відносності: механічні явища і процеси відбуваються однаково в усіх системах відліку, що рухаються рівномірно і прямолінійно**. Згодом І. Ньютон поклав його в основу класичної механіки у формулюванні першого закону механіки.

Класичні уявлення про простір і час давали можливість знайти зручну систему відліку, відносно якої простіше було описати явища, що відбуваються в безмежному евклідовому просторі і плінуть у буденному вимірі часу. Таким чином, класична теорія спроможна була пояснити широке коло механічних явищ, що відбуваються навколо нас. Це рух тіл з незначними швидкостями, який спостерігає людина в повсякденному житті, космічний рух планет, розрахунок траєкторій штучних

супутників Землі тощо. Проте, коли на початку ХХ ст. фізики намагалися пояснити природу явищ, де швидкість перебігу подій сумірна зі швидкістю світла (електромагнітне випромінювання, закономірності мікросвіту), класична теорія виявилася безпорадною. Як з'ясувалося пізніше, перегляду вимагали самі її основи, головним чином поняття простору й часу.

А. Ейнштейн припустив, що принцип відносності Г. Галілея стосується не лише механічних явищ, а поширюється на всі фізичні явища і процеси. Далі він постулював, що швидкість поширення світла не залежить від руху тіла, яке його випромінює. Ці два твердження покладено в основу **принципів СТВ**:

1) *в усіх інерціальних системах відліку, незалежно від стану їхнього руху, фізичні явища відбуваються за однаковими законами;*

2) *швидкість поширення світла у вакуумі є однаковою в усіх інерціальних системах відліку незалежно від їхнього руху і є граничною у передачі будь-якої взаємодії.*

**Граничний характер швидкості світла, незалежно від руху тіла, що його випромінює, був підтверджений численними найточнішими фізичними експериментами.**



Наприкінці ХІХ ст. американський учений А. Майкельсон установив, що швидкість світла у вакуумі є незмінною величиною в усіх інерціальних системах відліку, незалежно від руху тіла, що його випромінює. Цей дослідний факт, підтверджений багатьма експериментами, суперечив закону додавання швидкостей  $\vec{v} = \vec{v}_{\text{відл}} + \vec{v}_{\text{пер}}$  (див. § 7), згідно з яким швидкість світла в системі відліку, що рухається вздовж напрямку поширення світла, повинна дорівнювати  $c + v$  і не обмежується ніяким граничним значенням. Це змусило вчених переглянути основи класичної теорії, зокрема спрощені буденні уявлення про простір і час, якими керувалася класична фізика, і дати більш глибоке, узагальнене їх тлумачення.

**Уперше швидкість світла виміряв у 1676 р. датський астроном О. К. Ремер, спостерігаючи різницю в часі між затемненнями супутників Юпітера. Пізніше її значення уточнювали багато інших учених – англійський астроном Дж. Брадлей (1728), французькі фізики А. І. Л. Фізо (1849), Ж. Б. Л. Фуко (1862) та ін.**



Виміряне А. Майкельсоном у 1926 р. значення швидкості світла у вакуумі  $c = 2,99796 \cdot 10^8$  м/с довгий час було найточнішим і входило до міжнародних таблиць фундаментальних констант. Згідно із сучасними даними вона дорівнює  $2,99792458 \cdot 10^8$  м/с.

Постулати СТВ спонукали до іншого тлумачення фундаментальних понять простору й часу. Насамперед вони викликали необхідність об'єднати їх в єдиний континуум – простір-час. За таких умов кожній події, кожному явищу властива не лише просторова визначеність їхнього місцеперебування, а й зв'язана з ними часова характеристика їхнього перебігу. Це не механічне поєднання простору й часу, коли до системи координат додається годинник, а спільна, об'єднана інтерпретація явищ в просторово-часовому вимірі. Таке розуміння простору й часу



**Континуум** (від лат. *continuum*) – **неперервний, нерозривний**.

(краще сказати простору-часу) привело до зміни сутнісних положень фізики, зокрема одночасності подій, сповільнення часу і скорочення довжини.

126

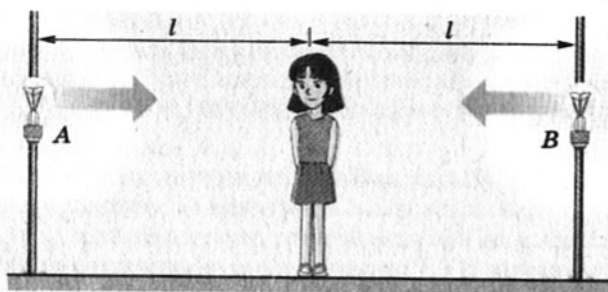
1. Які ознаки простору й часу покладено в основу класичної фізики?
2. Чим відрізняється принцип відносності Галілея від принципу відносності Ейнштейна?
3. Сформулюйте принципи, покладені в основу спеціальної теорії відносності.
4. Назвіть імена вчених, які вимірювали швидкість світла. Хто з них зробив це першим?
5. Які твердження СТВ увійшли в протиріччя з уявленнями класичної фізики про простір і час?

## § 37. Відносність одночасності подій

Завдяки перегляду сутності простору й часу в СТВ було спростовано твердження класичної фізики про одночасність подій, яким передбачалося, що в усіх інерціальних системах відліку, незалежно від їхнього руху, події відбуваються одночасно.

Тобто класичною фізикою стверджувалося, що події, одночасні в одній інерціальній системі відліку, будуть одночасними і в інших таких системах, незалежно від їхнього взаємного руху.

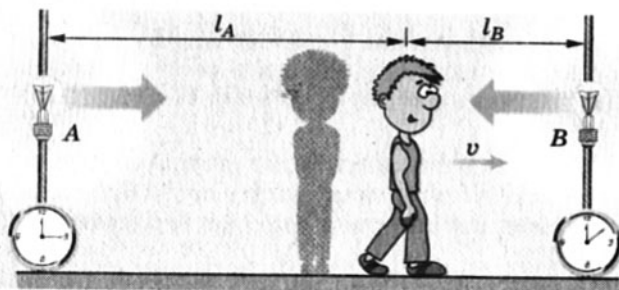
Для пояснення розбіжностей класичної механіки і СТВ розглянемо поширення світлового променя одночасно в нерухомій і рухомій системах відліку. Нехай у нерухомій системі відліку перебуває спостерігач (мал. 3.1). На однаковій відстані  $l$  від нього справа і зліва знаходяться джерела світла  $A$  і  $B$ , які періодично випромінюють світловий імпульс. У певний момент часу джерело світла  $A$  посилає імпульс у напрямі спостерігача. Синхронно такий самий імпульс випромінює і джерело світла  $B$ .



Мал. 3.1. Нерухомий спостерігач

Оскільки відстань від спостерігача до джерел світла однакова, то й час поширення світла також буде однаковим, адже  $t = \frac{l}{c}$ , а численними дослідженнями доведено, що швидкість світла має стале значення ( $c = \text{const}$ ). Якщо спостерігач зафіксує надходження імпульсів від обох джерел світла одночасно, то за такої умови можна робити висновок, що в точках A і B події (у даному випадку випромінювання світла) відбулися одночасно.

Нехай тепер інший спостерігач рухається в напрямі одного із джерел світла (мал. 3.2), наприклад правого. Тепер він матиме інший результат. Імпульс від джерела світла B надійде до нього раніше, ніж від джерела A, оскільки за час поширення імпульсу спостерігач наближається до джерела світла B і віддаляється від джерела A:  $t_A = \frac{l_A}{c}$ ,  $t_B = \frac{l_B}{c}$ . Звідси  $t_A > t_B$ , тому що  $l_A > l_B$ , а швидкість світла  $c = \text{const}$ . Тому для рухомого спостерігача час поширення світла від джерел A і B буде різним, отже, для рухомої системи відліку момент випромінювання світла не буде одночасним.



Мал. 3.2. Рухомий спостерігач



**Релятивістська механіка переглянула усталені уявлення про простір і час як абсолютні субстанції, які тривалий час успішно впорядковували наш повсякденний досвід.**

Таким чином, можна зробити висновок, що *дві події, які відбуваються в різних точках простору і є одночасними в одній системі відліку, не будуть одночасними в інших.*

Це твердження СТВ привело до дивовижного висновку, що *в рухомих системах відліку довжина скорочується, а час перебігу подій у такому випадку уповільнюється.*

А. Ейнштейн установив, що при переході від однієї системи відліку до іншої перетворення координат збігаються з формулами перетворень Лоренца:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, & y' &= y, & z' &= z, & t' &= \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

128

де  $x, y, z, t$  – координати і час в нерухомій системі відліку, а  $x', y', z', t'$  – відповідно у рухомій системі відліку.

Оскільки довжина визначається різницею координат ( $l = x_2 - x_1$ ;  $l' = x'_2 - x'_1$ ), з урахуванням формули (1) маємо:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

Це означає, що  $l' < l$ , тобто *довжина, виміряна в рухомій системі відліку, менша за довжину в системі, відносно якої та рухається*, адже множник  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  завжди менший за 1.



**Стержень завдовжки 1 м у системі відліку, що рухається із швидкістю, близькою до швидкості світла у вакуумі, наприклад 0,9c, матиме довжину приблизно 87 см.**

Так само в СТВ встановлено, що *виміряна в різних інерціальних системах відліку тривалість подій буде неоднаковою.* Це зумовлено неодновременністю подій, що відбуваються в різних системах відліку.

Нехай у нерухомій системі відліку певна подія триває протягом часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Тоді в рухомій системі відліку її тривалість визначатиметься інтервалом часу  $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ . З формул перетворень Лоренца (1) після певних математичних спрощень маємо:



$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Це співвідношення вказує на те, що в різних інерціальних системах відліку виміряна тривалість подій буде різною: *у рухомій системі відліку подія триває завжди довше, ніж у нерухомій* ( $\Delta t' > \Delta t$ ). Тобто для одного й того самого спостерігача в різних системах відліку час плине неоднаково: спостерігач в нерухомій системі відліку помічатиме, що годинник сповільнює свій хід у системах відліку, що рухаються відносно нього.

Якщо проаналізувати формули (2) і (3), то стає очевидним, що при відносно малих швидкостях ( $v \ll c$ ) підкореневий вираз приблизно дорівнює 1 і формули СТВ збігаються з виразами класичної механіки. **Скорочення довжини, уповільнення ходу годинника та інші наслідки просторово-часових властивостей фізичного світу помітні, якщо швидкості руху тіл наближаються до швидкості світла.**

Таким чином, завдяки більш глибокому тлумаченню властивостей простору й часу в СТВ, яке відповідає фундаментальним дослідним фактам, сучасна фізика отримала досконаліший інструмент пізнання природи, у якому класична теорія (механіка Ньютона) присутня як окрема система поглядів і теоретичних узагальнень за певних умов і обмежень (закономірності макросвіту, незначні швидкості руху тіл тощо).

1. Які твердження СТВ увійшли в протиріччя з уявленнями класичної фізики про простір і час?
2. Який висновок про одночасність подій зробив А. Ейнштейн?
3. Чи зміниться висновок СТВ про одночасність подій, якщо спостерігач рухатиметься в протилежний бік від зображеного на малюнку?
4. У чому суть висновку СТВ щодо довжини і тривалості подій у різних системах відліку?
5. Чому СТВ називають релятивістською фізикою?
6. У якій системі відліку – рухомій чи нерухомій – подія буде тривати менше часу?

## § 38. Взаємозв'язок маси і енергії

За законами Ньютона, якщо на тіло діє сила, то воно рухається з прискоренням. Якщо напрям дії сили збігається з напрямом руху, то швидкість тіла повинна необмежено зростати. Проте таке твердження суперечить другому принципу



**Не існує систем відліку, у яких швидкість руху тіла перевищувала б швидкість світла у вакуумі.**

пу СТВ, який обмежує швидкість передачі взаємодії значенням швидкості світла у вакуумі.

Для того щоб закони Ньютона були інваріантними (однаковими) в усіх інерціальних системах відліку,

що відповідає положенням СТВ, А. Ейнштейн запропонував переглянути деякі класичні уявлення про рух і взаємодію тіл.

Насамперед це стосується понять маси та енергії.

Як відомо, маса відображає такі властивості фізичних тіл:

- динамічну характеристику протидіяти зміні їх швидкості (так звана інертна маса), що входить до другого закону Ньютона;
- здатність створювати поле тяжіння і взаємодіяти з іншими зовнішніми гравітаційними полями (гравітаційна маса), що входить до закону всесвітнього тяжіння.

Теоретично встановлено та експериментально підтверджено з високою точністю, що інертна і гравітаційна маси рівні між собою, і тому у фізиці вживають єдине поняття маси. Крім того, ця фізична величина інваріантна щодо будь-яких інерціальних систем відліку.

Щоб рівняння релятивістської механіки були подібними до законів класичної механіки в усіх інерціальних системах, між масою та енергією мусить існувати зв'язок. А. Ейнштейн встановив, що за таких умов маса повинна визначатися з рівності:

$$m^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2},$$

де  $E$  – повна енергія тіла,  $p$  – його імпульс,  $c$  – швидкість світла.

Якщо обрати систему, у якій швидкість тіла  $v = 0$ , то його маса дорівнюватиме:  $m = \frac{E_0}{c^2}$ , тобто вона визначатиметься енергією спокою.

Ця знаменита формула взаємозв'язку маси та енергії є універсальною щодо будь-яких видів енергії. Вона передбачає, що *кожне тіло має енергію, потенціальний запас якої визначається його масою:  $E_0 = mc^2$ .*

Формула взаємозв'язку маси і енергії відіграє особливу роль в атомній та ядерній фізиці, де перетворення речовин у ядерних реакціях супроводжується значним вивільненням енергії.



1. Які властивості тіл відображає маса?
2. У чому виявляється універсальність формули взаємозв'язку маси й енергії?

## Вправа 25

1. З якою швидкістю має рухатися система відліку відносно іншої, щоб спостережувана довжина метрової лінійки в ній скоротилася на 20 см?

2\*. Елементарна частинка за час свого життя  $2,5 \cdot 10^{-8}$  с від «народження» до розпаду пролітає 500 м. У скільки разів її швидкість відрізняється від швидкості світла?

3. Сонце щосекунди випромінює у простір енергію  $3,75 \cdot 10^{26}$  Дж. На скільки змінюється за цей час його маса за рахунок теплового випромінювання?

## Головне в розділі 3

Сучасна механіка ґрунтується на постулатах, сформульованих у 1905 р. А. Ейнштейном. Створюючи спеціальну теорію відносності, учений переглянув спрощені класичні уявлення про простір і час як незалежні абсолютні субстанції. Він дав більш глибоке, узагальнене їх тлумачення, об'єднавши в єдиний континуум – простір-час. В основу спеціальної теорії відносності ним покладено два **принципи**:

1) *в усіх інерціальних системах відліку, незалежно від стану їх руху, фізичні явища відбуваються за однаковими законами;*

2) *швидкість поширення світла у вакуумі є сталою величиною для всіх інерціальних систем відліку і не залежить від їх руху; вона є граничною у передачі будь-якої взаємодії.*

Завдяки цьому в СТВ інакше тлумачиться поняття **одночасності подій**: *дві події, що відбуваються в різних точках простору і є одночасними в одній інерціальній системі відліку, не будуть одночасними в інших.*

А. Ейнштейн установив, що при переході від однієї системи відліку до іншої рівняння для перетворення координат збігаються з формулами перетворень Лоренца. Тому *довжина  $l'$ , виміряна у рухомій системі відліку, менша за довжину  $l$  у системі, відносно якої та рухається; тривалість події  $\Delta t'$  у рухомій системі завжди більша за її тривалість  $\Delta t$  у нерухомій системі.*

За допомогою математичних перетворень, що впливають з інваріантності законів класичної та релятивістської механіки, А. Ейнштейн установив універсальний для будь-яких видів енергії взаємозв'язок між масою і енергією:  $E_0 = mc^2$ .

Таким чином, завдяки більш глибокому тлумаченню властивостей простору й часу сучасна фізика отримала досконаліший інструмент пізнання природи, у якому класична теорія є частковою системою поглядів і теоретичних узагальнень для закономірностей макросвіту і незначних швидкостей руху тіл порівняно зі швидкістю світла у вакуумі.

# Розділ 4

## МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

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

- основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини, імена вчених, які зробили вагомий внесок у її створення;
- властивості твердих тіл, рідин і газів, зумовлені тепловим рухом атомів і молекул, газові закони, методи вимірювання вологості повітря;
- фізичні величини, що характеризують тепловий рух і будову речовини (кількість речовини, відносна вологість повітря, коефіцієнт поверхневого натягу рідини);
- основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії, рівняння стану ідеального газу;
- властивості кристалічних і аморфних тіл, рідких кристалів і полімерів та приклади їх застосування.

Ви зможете **пояснити**:

- суть ідеального газу як фізичної моделі реального газу;
- будову і властивості твердих тіл, рідин і газів, зумовлені рухом і взаємодією атомів і молекул;
- ізопроцеси в газах та їхні графіки;
- пароутворення і конденсацію газів, поверхневий натяг рідин, змочування і капілярні явища;
- плавлення і кристалізацію твердих тіл та особливості перебігу цих процесів в аморфних і кристалічних тілах.

Ви будете **здатні**:

- розв'язувати задачі, застосовуючи основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії, рівняння стану ідеального газу, газові закони Бойля-Маріотта, Гей-Люссака, Шарля, формулу відносної вологості повітря;
- розрізняти поняття насиченої і ненасиченої пари, кристалічного й аморфного тіла;
- досліджувати ізопроцеси, вимірювати відносну вологість;
- будувати графіки ізотермічного, ізохоричного та ізобаричного процесів.



# ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ, РІДИН, ТВЕРДИХ ТІЛ

133

Життя людини тісно пов'язане з тепловими явищами. Ми стикаємося з їх проявами так само часто, як і з механічними. Це – нагрівання чи охолодження тіл, залежність їхніх властивостей від температури, зміна агрегатних станів речовини тощо. Тому з давніх часів людство намагалось оволодіти «таємницею» теплових явищ, пояснити їхню природу, використати їх у буденному житті.

**Теплові явища і процеси пов'язані з передачею й перетворенням енергії, унаслідок чого відбувається зміна температури тіл або перехід речовини з одного агрегатного стану в інший.**



У фізиці природа теплових явищ пояснюється двома способами, які взаємно доповнюють один одного. Це **термодинаміка**, яка ґрунтується на узагальненні багатовікового досвіду спостережень за перебігом теплових явищ і розглядає їх з позицій макроскопічних характеристик речовини – тиску, температури, об'єму, густини тощо. Ця теорія теплоти формулює загальні принципи перебігу теплових явищ і процесів. Інший підхід – **молекулярно-кінетична теорія** (скорочено МКТ) – пов'язує їхній перебіг з особливостями внутрішньої будови речовини і вивчає причини, що зумовлюють тепловий рух. Вона пояснює властивості твердих тіл, рідин і газів на основі теплового руху мікрочастинок, з яких вони складаються.

Розвиток уявлень про природу теплоти відбувався в постійних дискусіях прихильників термодинамічного і молеку-

лярно-кінетичного підходів до пояснення теплових явищ. Перші аргументували переваги термодинаміки відносно простою опису теплових явищ і процесів, другі стверджували, що молекулярно-кінетична теорія більш глибока, оскільки виявляє їх природу.

Обидва ці підходи науково достовірні і взаємно доповнюють, а не суперечать один одному. Тому вивчення теплових явищ і процесів у подальшому буде розглядатися нами з позицій молекулярної фізики чи термодинаміки, залежно від простоти викладу матеріалу.

## § 39. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Молекулярна фізика, яка пояснює теплові явища на основі внутрішньої будови речовини, як теорія сформувалася наприкінці XIX ст. Вона ґрунтується на таких положеннях: 1) речовина складається з мікрочастинок – атомів, молекул, йонів тощо; 2) ці мікрочастинки перебувають у безперервному хаотичному русі й взаємодіють між собою.

134



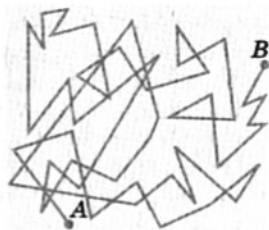
**Атомно-молекулярне вчення стверджує, що гази (за винятком інертних) складаються головним чином з молекул, більшість рідин має молекулярну будову, а будова кристалічних тіл зумовлена взаємодією йонів.**

Ці положення МКТ отримали експериментальне підтвердження. Спочатку це були непрямі докази існування атомів і молекул. Так, англійський хімік Дж. Дальтон у 1803 р. пояснив закон постійних відношень мас в хімічних реакціях. Наприклад, при утворенні води завжди справджується відношення мас реагуючих між собою речовин як 8 : 1. Це можна пояснити лише тим, що при утворенні молекули води певна кількість атомів Оксигену сполучається з певною кількістю атомів Гідрогену.

Пізніше, після відкриття електронного мікроскопа, який дає можливість отримувати збільшення в мільйони разів, стало можливим спостерігати мікроструктуру речовини і пересвідчитись у справедливості атомно-молекулярної гіпотези. Вимірювання мікрочастинок речовини показали, що молекули різних речовин відрізняються розмірами, проте всі атоми мають діаметр близько  $10^{-10}$  м.

Переконливим доказом існування молекул та їхнього хаотичного руху стали досліди англійського ботаніка Р. Броуна

(1773–1858), який у 1827 р. спостерігав рух квіткового пилку у воді. Він з'ясував, що цей рух є безладним і частинки рухаються складною траєкторією (мал. 4.1). Пізніше французький фізик Ж. Перрен (1870–1942) експериментально досліджував броунівський рух частинок гумігугу (фарбника) і виявив, що він є наслідком теплового руху молекул. Він установив, що інтенсивність броунівського руху частинки зростає з підвищенням температури і не залежить від часу чи хімічної природи частинки. У 1905–1906 рр. видатний фізик А. Ейнштейн і польський учений М. Смолуховський (1872–1917) дали теоретичне тлумачення броунівського руху з позицій молекулярно-кінетичних уявлень, чим остаточно підтвердили достовірність молекулярної фізики.



Мал. 4.1. Траєкторія руху броунівської частинки

Взаємодія молекул підтверджується наявністю сил пружності, які виникають під час деформації тіл. Вони короткодіючі, мають електромагнітну природу і суттєво залежать від відстані між молекулами (сила притягання  $F_{\text{пр}}$  пропорційна  $\frac{1}{r^7}$ , а сила відштовхування  $F_{\text{в}}$  пропорційна  $\frac{1}{r^{13}}$ ). Сила взаємодії практично відсутня, коли молекули знаходяться на відстанях, що в кілька разів перевищують їхні розміри. Цим, зокрема, пояснюється нехтування силами взаємодії в розріджених газах, у яких відстань між молекулами перевищує кілька їх діаметрів.

Таким чином, отримавши численні докази підтвердження своєї справедливості, атомно-молекулярна гіпотеза про будову речовини стала теорією і завоювала чільне місце серед сучасних фізичних теорій, зокрема як один з підходів до пояснення теплових явищ і процесів. Побудована на її положеннях молекулярна фізика пояснює перебіг теплових явищ на основі внутрішньої будови речовини.

1. У чому полягає суть молекулярно-кінетичної теорії? Сформулюйте її основні положення.
2. Які прямі і непрямі докази вірогідності атомно-молекулярного вчення про будову речовини вам відомі?
3. Які експерименти і теоретичні розрахунки остаточно утвердили вірогідність молекулярної фізики? Коли це сталося?

## § 40. Маса молекул. Кількість речовини

Малі розміри атомів і молекул зумовлюють їх незначну масу. Так маса молекули кисню дорівнює  $53,5 \cdot 10^{-27}$  кг, водню –  $3,34 \cdot 10^{-27}$  кг, води – приблизно  $30 \cdot 10^{-27}$  кг. Це викликає певні труднощі в розрахунках. Тому в молекулярній фізиці масу молекул часто вимірюють в атомних одиницях маси (а. о. м.), порівнюючи її з  $\frac{1}{12}$  маси Карбону-12.



**Маса молекули води дорівнює:**

$$18 \text{ а. о. м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 30 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Установлено, що атомна одиниця маси дорівнює  $1,6605655 \cdot 10^{-27}$  кг.

136

Оскільки розміри і маса молекул дуже малі, їх кількість у макроскопічному тілі значна. Наприклад, в 1 г води міститься близько  $3,3 \cdot 10^{22}$  молекул. Щоб спростити розрахунки, у фізиці й хімії прийнято порівнювати кількість атомів, молекул чи інших структурних одиниць у даному тілі з кількістю атомів у 12 г Карбону-12.

*Відношення кількості молекул  $N$  у даному тілі до кількості атомів  $N_A$  в 0,012 кг вуглецю С-12 називається кількістю речовини:*

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



$$N = \nu N_A.$$

Кількість речовини вимірюється в молях (познач. – моль) або кіломолях (кмоль). Моль – це така кількість речовини, яка містить стільки само атомів, молекул або інших структурних елементів речовини, скільки атомів міститься в 0,012 кг С-12.

Очевидно, що в 1 молі будь-якої речовини міститься однакова кількість атомів чи молекул. Цю величину називають сталою Авогадро  $N_A$  і вона є фундаментальною константою фізики:

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

У фізиці й хімії широко використовують поняття молярної маси. Це маса 1 моля речовини. Згідно з означенням в СІ вона вимірюється в кг/моль і дорівнює добутку маси молекули  $m_0$  на сталу Авогадро  $N_A$ :

$$M = m_0 N_A. \quad (2)$$



Молярна маса води ( $\text{H}_2\text{O}$ ) дорівнює

$$18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, \text{ або } 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$



Маса  $m$  довільної кількості речовини  $\nu$  визначається зі співвідношення:

$$m = m_0 N = \nu m_0 N_A = \nu M. \quad (3)$$

На підставі формули (1) і цього співвідношення можна отримати формулу для розрахунку загальної кількості молекул в тілі:

$$N = N_A \frac{m}{M}. \quad (4)$$

Таким чином, у вимірюваннях маси і кількості речовини молекулярна фізика використовує величини, які відомі вам з курсу хімії. Вони полегшують розрахунки відповідних фізичних величин, є відносними величинами і тому залежать від обраної шкали вимірювання. За міжнародною угодою нині в СІ прийнята вуглецева шкала атомних мас. Відносні атомні маси всіх відомих хімічних елементів наведені у Періодичній таблиці хімічних елементів Д. І. Менделєєва.

137

1. Що визначає кількість речовини? У яких одиницях вона вимірюється? Чому дорівнює 1 моль?
2. Який фізичний зміст сталої Авогадро?
3. Що таке молярна маса? Як її розрахувати для будь-якої речовини?



## § 41. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії

Відомо, що газ – це агрегатний стан речовини, у якому атоми і молекули перебувають на відстанях, значно більших за їхні власні розміри. Тому сили взаємодії між ними практично відсутні і молекули газів не тримаються одна біля одної. Вони хаотично рухаються, взаємодіючи між собою лише під час короткочасних зіткнень. Тому гази не мають власної форми і займають увесь наданий їм об'єм.

Гази легко стискаються, оскільки власний об'єм їх молекул значно менший за об'єм посудини, яку вони заповнюють.



Закони, які характеризують властивості газів, як правило, стосуються ідеального газу – спрощеної моделі реальних газів. Це викликано тим, що МКТ накладає певні обмеження, щоб відповідні рівняння справджувалися з достатньою точністю. Насамперед це стосується взаємодії між молекулами: вона повинна бути настільки мала, що нею можна знехтувати. Наступне обмеження стосується розміру молекул: вони повинні бути такими, що їх можна вважати матеріальними точками.



**Ідеальний газ – це модель МКТ, яка відображає властивості реальних газів, нехтуючи розмірами молекул та їхньою взаємодією.**

Таким чином, *ідеальний газ – це модель газу, яка передбачає нехтування розмірами молекул та їх взаємодією.*

Реальні гази набувають таких властивостей при значному розрідженні, коли середня відстань між молекулами набагато більша за їхній розмір. За таких умов практично відсутні сили притягання, а сили відштовхування діють лише під час короткочасних зіткнень молекул між собою.

Як відомо, МКТ пояснює властивості тіл на основі атомно-молекулярних уявлень про будову речовини. Так, за моделлю ідеального газу молекули весь час перебувають у безладному русі, стикаються між собою і зі стінками посудини.

138



**Тиск газу спричинюють удари в стінку посудини великої кількості молекул, які передають їй імпульс.**

Як відомо, МКТ пояснює властивості тіл на основі атомно-молекулярних уявлень про будову речовини. Так, за моделлю ідеального газу молекули весь час перебувають у безладному русі, стикаються між собою і зі стінками посудини.

ни, у якій містяться. Під час зіткнень зі стінкою вони діють на неї з силою, яка за другим законом Ньютона дорівнює:

$\bar{F} = \frac{\Delta(m\bar{v})}{t}$ . Це означає, що зміна модуля кількості руху всіх молекул  $\sum \Delta(mv_i)$  під час удару рівнозначна дії усередненого значення сили  $\bar{F}$  протягом часу  $t$ . Ця спільна дія молекул спричинює тиск газу, який дорівнює  $p = \frac{F}{S}$ .

Певні міркування щодо передачі імпульсу всіма молекулами, що перебувають в об'ємі  $V$ , дають можливість вивести остаточне рівняння для визначення тиску ідеального газу:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2,$$

де  $n$  – концентрація молекул газу,  $m_0$  – маса молекули,  $\bar{v}$  – її середня швидкість.

Це основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. Воно пов'язує між собою тиск ідеального газу як макропараметр термодинамічної системи з характеристиками його мікроскопічного стану (концентрація, маса і швидкість молекули).

Тому основне рівняння МКТ вважають містком між двома підходами в тлумаченні теплових явищ і процесів – термодинамічним і молекулярно-кінетичним.

1. Чим пояснюється тиск газу в МКТ?
2. Чому рівняння тиску ідеального газу називають основним рівнянням МКТ?



## § 42. Закон Бойля–Маріотта

Вивчаючи властивості газів, учені експериментально встановили функціональні залежності між фізичними величинами, що їх характеризують.

Перший газовий закон був відкритий англійським ученим Р. Бойлем у 1662 р. при дослідженні пружності повітря. Він узяв довгу зігнуту скляну трубку, запаяну з одного кінця, і почав наливати в неї ртуть доти, доки в короткому коліні не утворився невеликий закритий об'єм повітря (мал. 4.2). Потім він доливав ртуть у довге коліно, вивчаючи залежність між об'ємом повітря в запаяному кінці трубки і тиском, спричиненим ртуттю в лівому коліні. Порівнюючи результати, Р. Бойль з'ясував, що між тиском і об'ємом даної маси газу при сталій температурі існує обернена залежність:  $p \sim \frac{1}{V}$ .

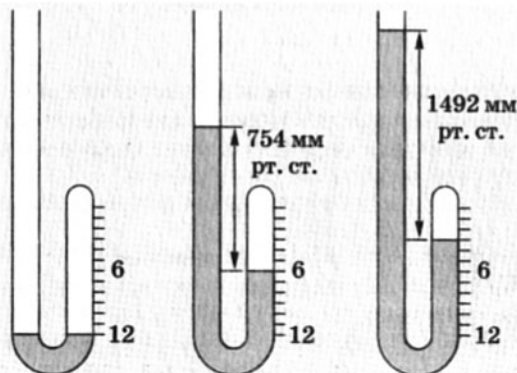
Пізніше, у 1676 р., французький учений Е. Маріотт незалежно від Р. Бойля узагальнено



Роберт Бойль  
(1627–1691)



Едм Маріотт  
(1620–1684)



Мал. 4.2. Дослід Р. Бойля

сформулював газовий закон, який тепер називають на честь двох учених – закон Бойля–Маріотта: якщо за певної температури дана маса газу займає об'єм  $V_1$  при тиску  $p_1$ , а в іншому стані при тій самій температурі його тиск і об'єм дорівнюють  $p_2$  і  $V_2$ , то справджується співвідношення:

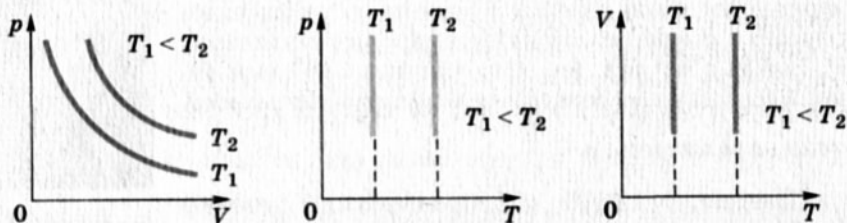
$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}, \text{ або } p_1 V_1 = p_2 V_2.$$



**Закон Бойля–Маріотта:** при сталій температурі об'єм  $V$  даної маси газу обернено пропорційний тиску газу  $p$ .

Тепловий процес, що відбувається при сталій температурі, називається ізоtermічним (від грец. *isos* – рівний, *thérmē* – тепло). Графічно на координатній площині  $pV$  він зображається гіперболою, яка називається ізоtermою (мал. 4.3). Різним температурам відповідають різні ізоtermи – чим більша температура, тим вище на координатній площині  $pV$  знаходиться ізоtermа ( $T_2 > T_1$ ). Очевидно, що на координатних площинах  $pT$  і  $VT$  ізоtermи зображаються прямими, перпендикулярними до осі температур.

140



Мал. 4.3. Ізоtermи

1. Поясніть, чому гази не мають власної форми.
2. Які обмеження містить модель ідеального газу?
3. За яких умов реальні гази можна вважати ідеальними?
4. У чому полягає суть дослідження Р. Бойля?
5. Між якими макропараметрами встановлює взаємозв'язок закон Бойля–Маріотта?
6. Який процес називається ізоtermічним?
7. Якими лініями відтворюється ізоtermа на різних координатних площинах?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Дослідження ізотермічного процесу

**Мета.** Перевірити дослідним шляхом закон Бойля–Маріотта.

**Обладнання:** скляний циліндр з водою заввишки 40–50 см; скляна трубка завдовжки 50 см, закрита (запаяна) з одного кінця; барометр; вимірювальна лінійка з ціною поділки 1 мм; штатив.

### Теоретичні відомості

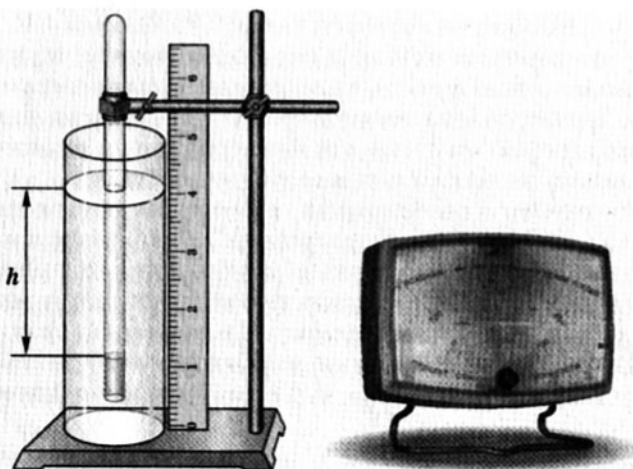
Закон Бойля–Маріотта встановлює співвідношення між тиском і об'ємом даної маси газу за сталої температури:  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ , або  $p_1V_1 = p_2V_2$ .

Якщо в циліндр з водою (мал. 4.4) опустити відкритим кінцем закриту з одного кінця скляну трубку, то повітря в ній перебуватиме під тиском:

$$p = \left( H + \frac{h}{13,6} \right),$$

де  $H$  – атмосферний тиск (у мм рт. ст.),  $h$  – різниця рівнів води в циліндрі і в трубці (виміряна у мм). Тиск змінюватиметься залежно від глибини занурення трубки у воду.

Об'єм стовпчика повітря в трубці дорівнює  $V = Sl$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу трубки,  $l$  – довжина стовпчика повітря в ній. Він також залежить від глибини занурення трубки.



Мал. 4.4. Вивчення ізотермічного процесу

## Виконання роботи

1. Занурити скляну трубку у воду відкритим кінцем на максимальну глибину. Виміряти довжину стовпчика повітря в ній  $l$  і різницю рівнів  $h$ .

2. Виміряти барометром атмосферний тиск (у мм рт. ст.) і обчислити значення тиску  $p$ , під яким перебуває повітря в трубці.

3. Дані записати в таблицю і провести інші необхідні обчислення<sup>1</sup>.

№	$H$ , мм рт. ст.	$h$ , мм	$p = \left( H + \frac{h}{13,6} \right)$ , мм рт. ст.	$V (l)$ , мм	$pV$
1					
2					
3					

142

4. Повторити дослід для іншої глибини занурення трубки, записати дані у таблицю і зробити необхідні обчислення.

5. Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювань. Записати отримані результати з урахуванням похибки вимірювання.

6. Порівняти одержані результати і зробити висновок.

## § 43. Закон Гей-Люссака

Відкриття газового закону Р. Бойлем і Е. Маріотом для ізотермічних процесів спонукало вчених шукати інші функціональні залежності між різними параметрами газів. У 1802 р. французький вчений Ж. Л. Гей-Люссак, досліджуючи залежність об'єму газу від температури за сталого тиску, відкрив закон, названий пізніше на його честь.

Скляну трубку з резервуаром, у якому міститься досліджуваний газ, він поміщав у нагрівник. Газ «закорковувався» маленькою крапелькою ртуті в трубці, яка розміщувалася горизонтально (мал. 4.5). Таким чином, тиск газу в резервуарі завжди дорівнював атмосферному. Температура газу в резервуарі змінювалася за допомогою нагрівника від 0 до 100 °С. Зміна об'єму газу від  $V_0$  (при  $t_0 = 0$  °С) до  $V$  при незмінному тиску

<sup>1</sup> Оскільки площа поперечного перерізу трубки  $S$  залишається незмінною, об'єм  $V$  можна обчислювати в умовних одиницях довжини  $l$ .

фіксувалася завдяки переміщенню крапельки ртуті.

Узагальнивши експериментальні дані, Гей-Люссак установив, що зі зміною температури за сталого тиску об'єм даної маси газу змінюється лінійно. На підставі цих спостережень він сформулював твердження, назване на його честь **законом Гей-Люссака**: *за сталого тиску відносна зміна об'єму газу даної маси прямо пропорційна зміні температури*:

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha t. \quad (1)$$

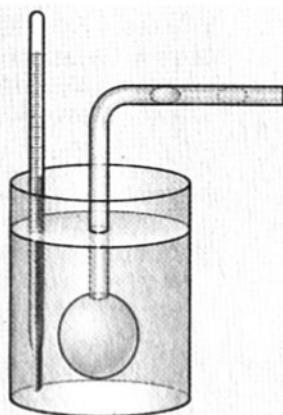
Зробивши певні математичні перетворення, закон Гей-Люссака можна записати також у вигляді:

$$V = V_0(1 + \alpha t). \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  називається температурним коефіцієнтом об'ємного розширення. Обчислення показали, що всі розріджені гази при нагріванні на 1 К змінюють свій об'єм приблизно на  $1/273$  частину від початкового об'єму<sup>1</sup>:

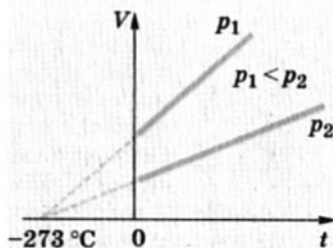
$$\alpha = \frac{V_{100} - V_0}{100^\circ\text{C} \cdot V_0} \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}.$$

Тепловий процес, який відбувається за сталого тиску, називається **ізобаричним** (від грец. *isos* – рівний і *baros* – вага), а лінії, що його зображають, **ізобарами**. На координатній площині залежності об'єму  $V$  від температури  $t$  ізобари матимуть вигляд прямих, що сходяться в одній точці (мал. 4.6). Їх нахил залежить від значення тиску – ізобара, що відповідає більшому тиску, розміщується нижче від ізобари меншого тиску ( $p_1 < p_2$ ).



Мал. 4.5. Дослід Ж. Л. Гей-Люссака

**Гей-Люссак довів, що в усіх газів температурний коефіцієнт об'ємного розширення однаковий і дорівнює  $1/273 \text{ K}^{-1}$ .**



Мал. 4.6. Ізобари

<sup>1</sup> Пригадаємо, що одиницею температури в СІ є кельвін (К), який за розміром дорівнює градусу Цельсія (°С).



1. У чому полягає суть досліду Гей-Люссака?
2. Між якими фізичними величинами встановлює зв'язок закон Гей-Люссака? У якій залежності вони знаходяться?
3. Який фізичний зміст має коефіцієнт об'ємного розширення газів?
4. Який процес називається ізобаричним?
5. Якими лініями відтворюються ізобари на координатній площині  $VT$ ?
6. Поясніть, за яких умов ізобари одного й того самого газу можуть мати різний нахил.

## § 44. Абсолютна шкала температур

Те, що всі ізобари сходяться в одній точці (див. мал. 4.6), не випадковість, а закономірність, яка має певний фізичний зміст. Закон Гей-Люссака не заперечує можливість безмежного зростання температури, адже об'єм газу з підвищенням температури може необмежено збільшуватися. Проте зі зменшенням температури він прямує до нуля і має межу ( $V = 0$ ), оскільки не може бути від'ємним<sup>1</sup>. Якщо прирівняти рівняння  $V = V_0(1 + \alpha t)$  закону Гей-Люссака до нуля як нижньої межі об'єму, то отримаємо значення найнижчої температури за шкалою Цельсія, яку можуть мати тіла:

$$0 = V_0 \left( 1 + \frac{1}{273} t \right).$$

$$\text{Звідси} \left( 1 + \frac{1}{273} t \right) = 0, t = -273 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Точне значення абсолютного нуля температур дорівнює  $-273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$  і має суто теоретичне обґрунтування.



**Вільям Томсон (лорд Кельвін) (1824–1907)** – англійський фізик, один із засновників термодинаміки і молекулярно-кінетичної теорії, теорії термоелектричних явищ, основ електромагнітних коливань. Сформулював другий закон термодинаміки, запровадив абсолютну шкалу температур (шкала Кельвіна), здійснив розрахунок розмірів молекул тощо. За видатні наукові досягнення отримав титул лорда Кельвіна.

Отже, температура може безмежно зростати, але в природі існує її нижня межа – **абсолютний нуль**, нижче якої вона не

<sup>1</sup> Насправді реальні гази навіть не можуть досягти цієї межі, оскільки їх атоми і молекули хоча й малі за розміром, але все-таки мають певний об'єм.



може бути. Ось чому ізобари всіх газів сходяться в одній точці на осі температур, яка дорівнює  $-273^\circ\text{C}$ .

Існування абсолютного нуля температур було покладено англійським ученим В. Томсоном (Кельвіном) в основу побудови більш досконалої абсолютної шкали температур, яка не залежить від властивостей метричного тіла і тому може вважатися ідеальною.

Точкою відліку шкали є абсолютний нуль температури. Одиницею вимірювання обрано величину, яка в СІ називається кельвіном (К) і дорівнює градусу Цельсія ( $^\circ\text{C}$ ):  $1\text{ K} = 1^\circ\text{C}$ . Тому між абсолютною температурою  $T$  і температурою за шкалою Цельсія  $t$  існує простий зв'язок (мал. 4.7):

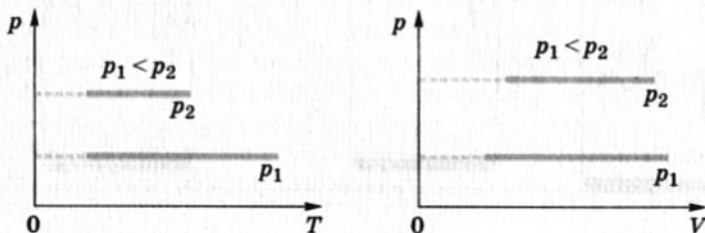
$$T = t + 273. \quad (1)$$

Поняття абсолютної температури широко використовують у молекулярній фізиці і термодинаміці, оскільки воно має глибокий фізичний зміст і спрощує запис багатьох рівнянь. Так, закон Гей-Люссака має більш просту форму, якщо його виразити через абсолютну температуру. Оскільки

$$1 + \alpha t = 1 + \frac{1}{273}(T - 273) = \alpha T, \text{ то } V = V_0 \alpha T.$$

Отже, 
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2)$$

Очевидно, що на координатних площинах  $pT$  і  $pV$  ізобарами є прямі, перпендикулярні до осі тиску (мал. 4.8).



Мал. 4.8. Ізобари



Мал. 4.7. Порівняння абсолютної шкали температур і шкали Цельсія

- ?
1. Чому існує нижня межа і не існує верхньої межі температур?
  2. Чому дорівнює абсолютний нуль температур за шкалою Цельсія?
  3. Чому абсолютну шкалу температур можна вважати ідеальною?
  4. Яке співвідношення існує між абсолютною температурою і температурою за шкалою Цельсія?
  5. У яких одиницях вимірюється абсолютна температура?

## § 45. Рівняння стану ідеального газу. Закон Шарля

Закони Бойля–Маріотта і Гей-Люссака встановлюють залежність між двома величинами – тиском  $p$  і об'ємом  $V$  або об'ємом  $V$  і температурою  $T$  відповідно, якщо маса газу, його температура або тиск залишаються сталими. Насправді ж у природі залежність між фізичними величинами буває складнішою, оскільки частіше змінюється більше ніж два параметри. Наприклад, якщо накачувати повітрям футбольний м'яч, то змінюватимуться маса повітря в ньому, його температура, тиск і об'єм.

146

Закон Бойля–Маріотта:

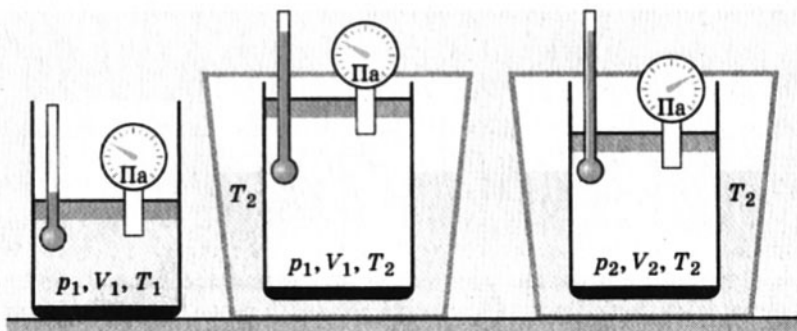
$$p_1 V_1 = p_2 V_2, T = \text{const.}$$

Закон Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, p = \text{const.}$$

З'ясувати функціональну залежність між параметрами газу означає знайти рівняння його стану. Встановлено, що для цього достатньо трьох величин – тиску  $p$ , об'єму  $V$  і температури  $T$ .

Нехай у циліндрі об'єму  $V_1$  з легкорухомим поршнем міститься



Мал. 4.9. Зміна стану газу внаслідок ізобаричного розширення та ізотермічного стиснення

певна маса розрідженого газу під тиском  $p_1$  при температурі  $T_1$  (мал. 4.9). Будь-яким способом змінимо стан даного газу, у якому він характеризуватиметься тиском  $p_2$ , об'ємом  $V_2$  і температурою  $T_2$ . Перехід газу зі стану 1 у стан 2 графічно зображено на малюнку 4.10.

Для спрощення виведення рівняння змінимо стан газу завдяки двом послідовним процесам – ізобаричному та ізотермічному, які описуються відповідно законами Гей-Люссака і Бойля–Маріотта. Із цією метою помістимо циліндр в посудину з гарячою водою.

Спочатку температура газу зростатиме. Щоб тиск газу залишався сталим (умова ізобаричного процесу), поступово збільшуватимемо його об'єм, пересуваючи поршень вгору. Коли температура газу досягне значення  $T_2$ , газ матиме об'єм  $V'$ . Графічно таке ізобаричне розширення газу зображено прямою.

Тепер ізотермічно стиснемо газ до об'єму  $V_2$  (ділянка гіперболи 1'–2). Таким чином, ізобаричним розширенням та ізотермічним стисненням ідеальний газ певної маси переведено зі стану 1 ( $p_1, V_1, T_1$ ) в стан 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ). Математично такий перехід відтворюють закони Гей-Люссака і Бойля–Маріотта:

$$\text{для ізобаричного розширення } \frac{V_1}{V'} = \frac{T_1}{T_2};$$

$$\text{для ізотермічного стиснення } p_1 V' = p_2 V_2, \text{ або } V' = V_1 \frac{T_2}{T_1}.$$

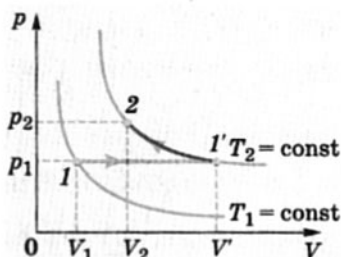
Після нескладних математичних перетворень отримаємо співвідношення, яке називається **рівнянням стану ідеального газу**:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ при } m = \text{const.} \quad (1)$$

Таким чином, між тиском, об'ємом і температурою ідеального газу існує залежність, яка визначається відношенням добутку тиску на об'єм газу до його температури, яке залишається незмінним для різних станів газу певної маси.

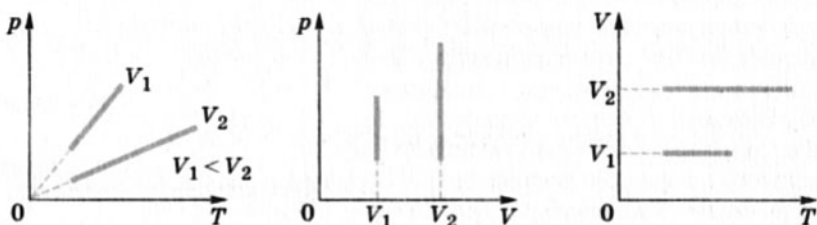
Усі газові закони, відкриті експериментальним шляхом, можна отримати як наслідок цього рівняння, поклавши сталим один з параметрів. Так, якщо здійснювати тепловий процес при сталому об'ємі ( $V = \text{const}$ ), то матимемо залежність між тиском даної маси газу і його температурою:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2)$$



Мал. 4.10. Графічне зображення зміни стану газу

Такий процес називається **ізохоричним**, а лінія, що його відображає, **ізохорою**. На координатній площині  $pT$  (мал. 4.11) ізохори мають вигляд прямих, що виходять з початку координат; у координатних площинах  $pV$  і  $VT$  вони перпендикулярні до осі об'єму.



Мал. 4.11. Ізохори

Співвідношення (2) можна записати також як пряму пропорційність між тиском і абсолютною температурою:

148

$$p = p_0 \gamma T, \quad (3)$$

де  $p_0$  – тиск газу при температурі  $T_0 = 273$  К,  $\gamma$  – температурний коефіцієнт тиску, який дорівнює  $\frac{1}{273}$  К<sup>-1</sup>. Він характеризує відносну зміну тиску внаслідок зміни температури на 1 К.

Урахувавши співвідношення між абсолютною температурою і температурою за шкалою Цельсія ( $T = t + 273$ ), отримаємо газовий закон, який уперше сформулював французький фізик Ж. Шарль:

$$p = p_0 (1 + \gamma t). \quad (4)$$

Отже, за законом Шарля ізохоричні процеси відбуваються таким чином, що між тиском і температурою ідеального газу існує лінійна залежність – з підвищенням температури даної маси газу його тиск зростає.

1. Залежність між якими величинами встановлює рівняння стану ідеального газу?
2. Завдяки яким ізопроцесам можна змінити стан ідеального газу? Які закони відповідають цим ізопроцесам?
3. Для яких термодинамічних процесів виконується закон Шарля? Між якими величинами він установлює залежність?
4. Що таке ізохора? Який вигляд вона має в різних координатних площинах?

## § 46. Рівняння Менделєєва–Клапейрона

Рівняння стану ідеального газу  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$  при  $m = \text{const}$  можна записати у вигляді:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (1)$$

Установлено, що для 1 моля газу ця константа дорівнює  $8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ . Її назвали **універсальною газовою сталою** (позначається  $R$ ). Отже, для 1 моля газу рівняння стану ідеального газу можна записати у формі **рівняння Клапейрона**, який уперше його одержав:

$$pV_M = RT, \quad (2)$$

де  $V_M$  – об'єм 1 моля газу, або молярний об'єм.

Відомий російський учений-хімік Д. І. Менделєєв вивів рівняння стану для довільної маси газу. Враховуючи, що об'єм довільної маси газу  $V = \nu V_M = \frac{m}{M} V_M$ , де  $\nu$  – кількість речовини,  $m$  – маса газу,  $M$  – його молярна маса, він записав рівняння стану ідеального газу в більш загальному вигляді:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (3)$$

У такій формі воно називається **рівнянням Менделєєва–Клапейрона**.

**Рівняння Менделєєва–Клапейрона є загальним рівнянням стану ідеального газу для довільної його кількості.**

1. Залежність між якими фізичними величинами встановлює рівняння Клапейрона?
2. Чому дорівнює універсальна газова стала?
3. Чим відрізняється рівняння стану ідеального газу від рівняння Менделєєва–Клапейрона?

### Вправа 26

1. Скільки молекул міститься в 2,5 г сірководню?
2. Куля об'ємом 5 л заповнена киснем, маса якого дорівнює 20 г. Визначити концентрацію молекул кисню в кулі.
3. Визначити кількість молекул, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  кисню, водню, азоту та інших газів за нормальних умов. Зробити висновок.

4. У двох посудинах однакового об'єму містяться вода і ртуть. У якій з посудин атомів більше і в скільки разів?

5. За 1 с зі склянки води випаровується  $4 \cdot 10^{18}$  молекул води. За який час випарується 50 г води?

6\*. Суміш газу складається з 30 г азоту і деякої кількості вуглекислого газу. Молярна маса суміші дорівнює  $32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

Знайти масу вуглекислого газу в суміші.

7. Дві посудини з'єднані між собою трубою з краном. У першій посудині об'ємом 1 л знаходиться газ під тиском  $2 \cdot 10^5$  Па; у другій посудині об'ємом 3 л – під тиском  $1 \cdot 10^5$  Па. Який тиск установиться в посудинах, якщо відкрити кран?

8. У запаяній з одного кінця трубці завдовжки 70 см знаходиться стовпчик ртуті заввишки 20 см, який закорковує її на рівні верхнього краю. Трубку повільно перевертають, і частина ртуті виливається. Знайти висоту стовпчика ртуті, що залишилася в трубці, якщо атмосферний тиск дорівнює 750 мм рт. ст.

9. Ідеальний газ зазнає спочатку ізохоричного охолодження, а потім ізотермічного стискування. Зобразити ці процеси в координатах  $pT$ ,  $VT$ ,  $pV$  за умови, якщо  $p_1 = p_3$ .

10\*. Газ, який займав об'єм 10 л при тиску  $0,5 \cdot 10^5$  Па, стиснули ізотермічно до об'єму 2 л, а потім ізохорно підвищили його температуру в 2 рази. Чому дорівнює тиск газу? Зобразити процеси графічно в координатах  $pT$ .

11. У посудині об'ємом 2 л міститься кисень під тиском 90,6 кПа. Визначити кількість молекул кисню в посудині, якщо їх середня швидкість дорівнює  $228 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

12. Який тиск на стінки посудини чинять молекули газу, що мають середню швидкість  $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , якщо об'єм посудини, у якій вони містяться, дорівнює 0,5 л, а його маса – 3 г?

13\*. У циліндрі з рухомим поршнем міститься газ при атмосферному тиску і температурі  $27^\circ\text{C}$ . За допомогою поршня газ стиснули до вдвічі меншого об'єму і одночасно нагріли до  $327^\circ\text{C}$ . Чому дорівнює тиск газу?

14\*. У балоні об'ємом 12 л міститься кисень під тиском  $1 \cdot 10^5$  Па при температурі  $27^\circ\text{C}$ . Визначити густину кисню.

15. У балоні об'ємом 24 л міститься водень при температурі  $15^\circ\text{C}$ . Після того як частину водню використали, тиск у балоні знизився на  $4 \cdot 10^5$  Па. Визначити масу використаного водню.

16\*. У балоні об'ємом 110 л міститься 0,56 кг азоту і 1,6 кг кисню. Визначити тиск суміші газів при температурі  $27^\circ\text{C}$ .

17\*. Однакові маси азоту і водню мають однаковий тиск і однакову температуру. Який газ займає більший об'єм?

18. Де більше молекул при нормальному атмосферному тиску і температурі 20 °С: у кімнаті об'ємом 50 м<sup>3</sup> чи в склянці води об'ємом 200 см<sup>3</sup>?

## § 47. Пароутворення і конденсація. Насичена і ненасичена пара

Відомо, що рідини можуть випаровуватися, переходячи в газоподібний стан. Процес пароутворення може відбуватися з вільної поверхні рідини або всередині її об'єму, під час кипіння. Він відбувається внаслідок поглинання певної кількості теплоти:

$$Q = rm,$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення, яка залежить від роду речовини;  $m$  – її маса.

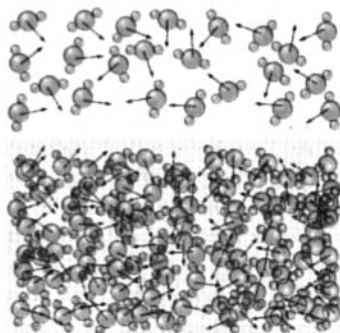
Питома теплота пароутворення вимірюється в  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Чисельно вона дорівнює кількості теплоти, яка необхідна для переходу 1 кг рідини в пару за певної температури. У таблицях її значення вказують, як правило, для температури кипіння.

У природі відбувається також і зворотний процес – перехід пари в рідину. Він називається конденсацією. Унаслідок конденсації пари рідина отримує таку саму кількість теплоти, яка необхідна для її випаровування.

Випаровування рідин відбувається тому, що деякі молекули рідини мають швидкість, а отже, і кінетичну енергію, достатню для виконання роботи з подолання сил притягання між ними. Чим вища температура рідини, тим більша частка таких молекул. За певних умов ці молекули вилітають з вільної поверхні рідини (мал. 4.12) і можуть назавжди її покинути (випаровування) або повернутися назад (конденсація).

Інтенсивність випаровування рідин залежить від багатьох факторів – роду речовини (бензин швидше випаровується, ніж вода), температури і площі вільної поверхні рідини (чим вона більша, тим більша кількість молекул вилітає з неї), зовнішніх умов (вітер, тиск, густина пари).

Пара може бути насиченою і ненасиченою, що залежить від її



Мал. 4.12. Молекулярна картина випаровування і конденсації рідини

густини, температури й тиску. Пара, що знаходиться в динамічній рівновазі з власною рідиною, є **насиченою**. Насичена пара утворюється в закритій посудині над вільною поверхнею рідини.



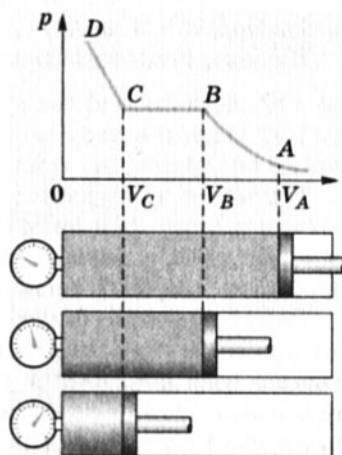
**Динамічна рівновага між рідиною і паром виникає тоді, коли кількість молекул, що вилітає з вільної поверхні рідини, дорівнює кількості молекул, які повертаються в неї.**

У відкритій посудині, оскільки певна кількість молекул випаровується в атмосферу і не повертається в рідину, порушується динамічна рівновага і пара стає **ненасиченою**.

Насичена і ненасичена пара має різні властивості. Дослідимо їх.

Нехай ненасичена пара за температури  $T$  знаходиться в циліндрі з поршнем (мал. 4.13). Почнемо повільно її стискати, щоб забезпечити ізотермічний процес. Спочатку при значному розрідженні пари залежність тиску від об'єму задовольнятиме закон Бойля-Маріотта для ідеального газу:  $pV = \text{const}$ . Проте зі зменшенням об'єму ненасиченої пари (збільшенням її густини) починає спостерігатися відхилення від нього. Подальше ізотермічне стискання пари веде до того, що вона починає конденсуватися (точка  $B$ ), у циліндрі утворюються крапельки рідини і пара стає насиченою. Її густина, отже, і концентрація молекул набувають максимального значення для даної температури. Вони не залежать від об'єму, який займає насичена пара, і визначаються її тиском і температурою.

Під час стискання насиченої пари (ділянка  $BC$ ) її тиск не змінюватиметься ( $p = \text{const}$ ). Це пояснюється тим, що при зменшенні об'єму насичена пара конденсується, утворюючи рідину. Її частка в об'ємі циліндра весь час збільшується, а об'єм, який займає насичена пара, зменшується. Це відбувається доти, доки вся насичена пара не перейде в рідкий стан (точка  $C$ ). Подальше зменшення об'єму викликає різке зростання тиску (ділянка  $CD$ ), оскільки рідини майже не стискаються.



Мал. 4.13. Ізотермічне стискання пари



**Ізотерми реального газу характеризують його рівноважний стан з рідиною. Їх сукупність дає можливість з'ясувати залежність тиску насиченої пари від температури.**



Отже, під час ізотермічного стискання ненасиченої пари спочатку (при незначній густині) вона виявляє властивості ідеального газу. Коли пара стає насиченою, її властивості підпорядковуються іншим закономірностям. Графік залежності тиску  $p$  від об'єму  $V$ , зображений на малюнку 4.13, називається ізотермою реальних газів.

1. Які процеси характеризують перехід рідин у газоподібний стан і навпаки?
2. Яка пара називається насиченою? Що характерно, з молекулярної точки зору, для насиченої пари?
3. Чим відрізняються властивості насиченої і ненасиченої пари?
4. За яких умов пару можна вважати ідеальним газом?
5. Чим відрізняється ізотерма реального газу від ізотерми ідеального газу?



153

## § 48. Вологість повітря. Точка роси

Відомо, що атмосфера Землі складається із суміші газів (азоту, кисню тощо) і водяної пари. Її вміст в атмосфері характеризує вологість повітря. Ступінь вологості повітря залежить від багатьох факторів – фізичного стану атмосфери, температури, близькості морів і океанів тощо. Для її оцінювання користуються поняттями абсолютної і відносної вологості. *Абсолютна вологість характеризує масу водяної пари, що міститься при даній температурі в 1 м<sup>3</sup> повітря.* Фактично, це густина водяної пари в повітрі при певній температурі, адже

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

Абсолютна вологість повітря не дає можливості достатньо повно оцінити ступінь насичення повітря водяною парою. Тому на практиці застосовують відносну характеристику вологості повітря, визначену у відсотках. *Відносна вологість – це відношення парціального тиску во-*

**Тиск, який у суміші газів створює кожний газ окремо, ніби він один займає весь об'єм, називається парціальним.**



для пари  $p$  за даної температури до тиску насиченої пари за цієї самої температури  $p_n$ :

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$$

Таким чином, щоб знайти відносну вологість повітря, треба знати парціальний тиск пари за даної температури і тиск насиченої пари за цієї самої температури. Парціальний тиск пари можна знайти, скориставшись поняттям точка роси.

**Відносна вологість повітря може бути визначена також через густину водяної пари:**

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\%$$

Нехай за певної температури повітря  $t_1$  (мал. 4.14) водяна пара має парціальний тиск  $p_1$  (точка А). Якщо повітря охолоджувати за того самого тиску, то пара буде наближатися до стану насичення, оскільки він залежить від температури – чим вона нижча, тим меншим буде тиск насиченої пари. У точці В водяна пара стає насиченою, починає конденсуватися; кажуть, випадає роса. Температура  $t_p$ , до якої треба ізобарично охолодити повітря даної вологості, щоб водяна пара стала насиченою, називається точкою роси.

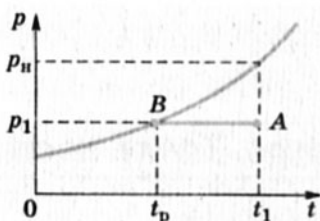
Знаючи температуру точки роси, за допомогою таблиці можна визначити парціальний тиск водяної

пари повітря даної вологості – він дорівнює тиску насиченої пари при цій температурі.

Таблиця

**Тиск і густина насиченої водяної пари**

$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$
0	0,61	0,0048	16	1,81	0,0136
2	0,71	0,0056	18	2,07	0,0154
4	0,81	0,0064	20	2,33	0,0173
6	0,93	0,0073	22	2,64	0,0194
8	1,07	0,0083	24	2,99	0,0218
10	1,23	0,0094	26	3,36	0,0244
12	1,40	0,0107	28	3,79	0,0272
14	1,60	0,0121	30	4,24	0,0303



Мал. 4.14. Точка роси

Відносну вологість повітря можна визначити також за відповідними значеннями густини водяної пари за температури точки роси  $t_p$  і густини насиченої водяної пари  $\rho_n$ .

Вологість повітря вимірюють за допомогою гігрометрів або використовуючи психрометричну таблицю вологості.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Вимірювання відносної вологості повітря

**М е т а.** Ознайомитися з методами визначення вологості повітря і за допомогою одного з них виміряти відносну вологість повітря в класній кімнаті.

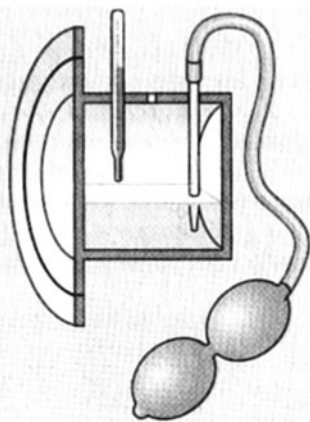
**О б л а д н а н н я:** волосяний і конденсаційний гігрометри, психрометр, психрометрична таблиця.

### Теоретичні відомості

Здавна було помічено, що довжина знежиреного волосся залежить від вологості повітря – чим вона вища, тим більше видовжується волосина. Проградувавши таким чином шкалу приладу залежно від вологості повітря, можна отримати найпростіший волосяний гігрометр. У сучасних волосяних гігрометрах використовують капронову нитку, яка має такі самі властивості. На жаль, точність волосяних гігрометрів невисока, і тому їх застосовують, як правило, у побутових вимірюваннях та в сувенірній продукції.

Визначення вологості повітря за точкою роси покладено в основу принципу дії конденсаційного гігрометра (мал. 4.15). Він складається з металевої камери, поверхня однієї грані якої дзеркально відполірована. У камери є три отвори – один для термометра і два – для продування крізь неї повітря. Камеру до половини заповнюють рідиною, яка легко випаровується, наприклад ефіром. Щоб прискорити випаровування ефіру, крізь нього за допомогою гумової груші продувають повітря.

Інтенсивне випаровування рідини відбирає в камери теплоту, і вона швидко охолоджується. Повітря біля самої камери також охолоджується, і за певної температури водяна пара, що міститься в ньому, стає насиченою. Оскільки в цей момент водяна пара починає конденсуватися, на дзеркальній поверхні гігроме-



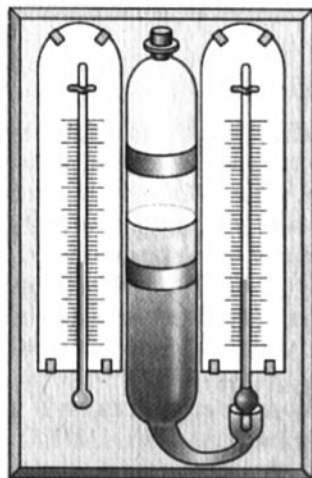
Мал. 4.15. Конденсаційний гігрометр

тра утворюється роса, і вона тьмяніє. Температура  $t_p$ , за якої це відбувається, називається точкою роси. Її фіксують за допомогою термометра, який уставлений в камеру гігрометра.

За точкою роси в таблиці знаходять тиск насиченої водяної пари, який дорівнює її парціальному тиску  $p$  за даної температури  $t$  у кімнаті. Знайшовши за цією таблицею тиск насиченої водяної пари  $p_n$  при кімнатній температурі  $t$ , за формулою

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100 \% \text{ обчислюють відносну вологість повітря } \varphi.$$

Досить точно відносну вологість повітря вимірюють також за допомогою психрометра (мал. 4.16) – приладу, що складається з двох однакових термометрів, один з яких обмотаний




Мал. 4.16. Психрометр

вологою легкою тканиною (ситцем або марлею). Якщо водяна пара в повітрі ненасичена (тобто  $\varphi < 100 \%$ ), то вода з тканини буде випаровуватися і покази «вологого» термометра будуть нижчі, ніж «сухого». Адже чим інтенсивніше випаровується вода, тобто чим менше насичене повітря водяною парою, тим нижчі покази «вологого» термометра. Отже, за різницею їх показів можна характеризувати відносну вологість повітря. Із цією метою складається так звана психрометрична таблиця, за допомогою якої знаходять конкретні значення відносної вологості повітря (з нею можна ознайомитися за довідниками або в збірниках задач).

### Виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою приладу, за допомогою якого буде визначатися відносна вологість повітря.
2. Скласти план досліду відповідно до обраного методу вимірювання вологості повітря.
3. Записати необхідні дані в таблицю і обчислити відносну вологість повітря в кімнаті.
4. Обчислити кількість водяної пари в кімнаті, зробивши необхідні додаткові вимірювання.

- 
1. Що називається абсолютною і відотною вологістю повітря?
  2. Що таке точка роси?
  3. Які методи вимірювання вологості вам відомі? Який з них найточніший?
  4. Коли абсолютна вологість повітря більша – взимку чи влітку?
  5. Яке значення має вологість повітря для життя на Землі?

## § 49. Поверхневий натяг рідин. Капілярні явища

У житті ми часто спостерігаємо властивості рідин, природа яких зумовлена їхньою молекулярною будовою. Наприклад, рідина на межі з твердим тілом може змочувати або не змочувати його поверхню; на межі з газом вона утворює вільну поверхню. Це пояснюється тим, що молекули поверхневого шару рідини взаємодіють між собою інакше, ніж молекули всередині неї.

**Вилита на підлогу вода розтікається по її поверхні, утворюючи тонкий шар.**

«Внутрішні» молекули рідини рівномірно оточені з усіх боків іншими такими самими молекулами, і тому рівнодійна сила міжмолекулярної взаємодії намагається утримати їх у стабільному положенні. Молекули, що перебувають у поверхневому шарі, взаємодіють головним чином зі своїми «внутрішніми» молекулами, оскільки їх взаємодія з молекулами газу значно слабша. Щоб утримати їх у поверхневому шарі, треба виконати роботу проти некомпенсованих сил, які намагаються втягнути поверхні молекули всередину рідини. Тобто молекули поверхневого шару мають надлишкову потенціальну енергію  $U_n$ , яка називається **поверхневою енергією**. Віднесена до одиниці площі  $S$  поверхнева енергія називається **поверхневим натягом**  $\sigma$ :

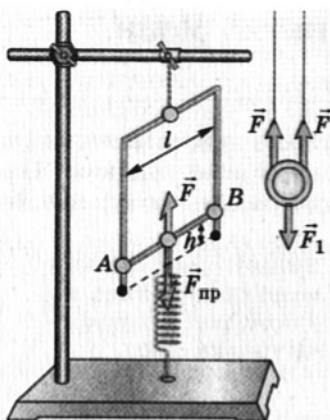
$$\sigma = \frac{U_n}{S}.$$

У СІ поверхневий натяг вимірюється в джоулях на квадратний метр ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ).

У стані рівноваги, коли на тіло не діють інші сили, молекулярні сили намагаються скоротити вільну поверхню рідин. Тому за відсутності дії інших сил, наприклад у невагомості, рідини приймають форму кулі, оскільки з математики відомо, що сфера має найменшу площу поверхні з-поміж інших фігур однакового об'єму.

Сили, які діють уздовж поверхні рідини і викликають зменшення її площі, називають силами поверхневого натягу. Їх прояв можна спостерігати за допомогою дротяної рамки, одна зі сторін якої рухома (мал. 4.17). Якщо занурити рамку в мильний розчин і потім вийняти її, то на ній утвориться мильна плівка, яка скорочуватиме свою поверхню. Рухома дротинка  $AB$

**Поверхнева енергія пропорційна площі поверхні рідини: чим вона більша, тим більша поверхнева енергія.**



Мал. 4.17. Дія сил поверхневого натягу

буде пересуватися вгору доти, доки не зрівноважаться сила тяжіння, що діє на неї, із силою поверхневого натягу, яка прагне скоротити поверхню плівки.

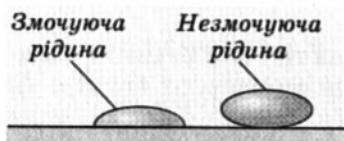
Поверхневий натяг залежить від наявності в рідині домішок, які впливають на її поверхневі властивості. Існують речовини, наприклад мило і пральні порошки, які можуть у кілька разів зменшувати поверхневий натяг води. Цю їх властивість використовують для прання білизни. Такі речовини, як бензин, спирт, уайт-спирит, за природою мають малий поверхневий натяг, і тому їх застосовують під час хімічного очищення одягу.

158

**Для того щоб захистити металеві вироби від хімічної корозії, їх покривають мастилом, яке викликає незмочування рідиною поверхні металу.**

Взаємодією молекул рідин на межі з твердими тілами також не можна нехтувати, оскільки сили притягання між молекулами рідини й твердого тіла можуть переважати сили взаємодії між самими молекулами рідини. Якщо це так, то кажуть, що рідина змочує тверді тіла. Так, вода змочує чисті поверхні скла, дощаної підлоги, металеві предмети. Проте якщо їх вкрити масляною плівкою, наприклад намастити підлогу, вода збиратиметься в малі й великі краплі і не змочуватиме ці поверхні. Це пояснюється тим, що сили притягання між молекулами рідини переважають сили притягання їх до молекул твердого тіла.

Таким чином, змочування чи незмочування рідинами поверхні твердих тіл на межі їх дотику зумовлено їхньою міжмолекулярною взаємодією.



Мал. 4.18. Змочування і незмочування

З'ясувати, чи змочує рідина тверде тіло, можна за формою краплі на його поверхні (мал. 4.18): якщо рідина розтікається по ній, то вона змочує поверхню твердого тіла; і навпаки, якщо вона збирається в «мішечок», то це вказує на те, що поверхня рідиною не змочується.

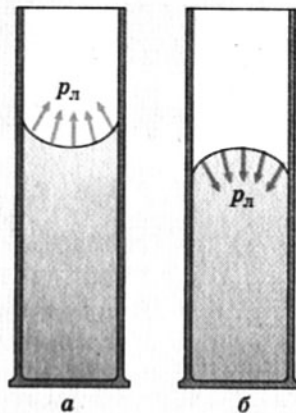
Властивість рідин змочувати чи не змочувати поверхні твердих тіл виявляється у викривленні їхньої вільної поверхні на межі з посудиною. Рідина, що змочує поверхню, ніби піднімається по її краях, утворюючи ввігнуту поверхню – ввігнутий меніск; незмочуюча рідина має опуклий меніск (мал. 4.19). У тонких трубках меніск має сферичну форму.

Викривлення вільної поверхні рідини відбувається внаслідок взаємодії молекул рідини і твердого тіла. Взаємодія ж між молекулами самої рідини намагається її вирівняти, оскільки сили поверхневого

натягу прагнуть зробити поверхню найменшою. Тому в рідині виникає додатковий, так званий лапласівський тиск<sup>1</sup>, який спрямований на вирівнювання вільної поверхні: для ввігнутого меніска – з рідини назовні, для опуклого – усередину, у рідину.

У тонких трубках, які називаються капілярами, лапласівський тиск спричинює підняття в них рівня рідини або його зниження. Це явище називається капілярним. Наприклад, якщо тонку скляну трубку опустити у воду, то рівень води в ній буде вищим за основний, оскільки вода змочує скло. Якщо її занурити у ртуть, то внаслідок незмочування ртуттю поверхні скла він буде нижчим.

Капілярні явища відіграють значну роль у природі, побуті і техніці. Завдяки їм відбуваються процеси живлення рослин, зволоження ґрунтів підземними водами. Їх використовують у різних технічних пристроях, під час висушування пористих речовин, для вимірювання поверхневого натягу різних рідин. У будівельній справі їх ураховують при ізоляції фундаменту від самої будівлі, прокладаючи між ними не змочувані водою матеріали (руберойд).



Мал. 4.19. Увігнутий і опуклий меніски

1. Чому поверхневий шар рідин має особливі властивості?
2. Що називається поверхневим натягом? Який його фізичний зміст?
3. Чому виникає сила поверхневого натягу? Від чого вона залежить?
4. Які явища викликає міжмолекулярна взаємодія рідин і твердих тіл?

<sup>1</sup> Названо на честь видатного французького вченого П. Лапласа (1749–1827), який уперше його розрахував.



5. Як візуально можна з'ясувати, чи змочує рідина поверхню твердого тіла?
6. У чому полягає суть капілярних явищ?
7. Наведіть приклади прояву капілярних явищ у природі.

## § 50. Бугова і властивості твердих тіл

В означенні твердих тіл ми, як правило, пов'язуємо їх із зовнішніми ознаками – збереженням форми і об'єму. Проте між собою тверді тіла відрізняються також за внутрішньою будовою. Одні з них мають кристалічну будову, тобто мікрочастинки (атоми, йони, молекули), з яких вони складаються, зберігають дальній порядок розміщення на значних відстанях. Такі тверді тіла називають **кристалічними**. До них належать метали, кухонна сіль, цукор, алмаз, графіт, кварц тощо.



**Тверді тіла впродовж тривалого часу зберігають свою форму, і щоб змінити їхній об'єм, треба докласти значних зусиль.**

160

Інші тіла не мають такої кристалічної будови і за своєю внутрішньою будовою більше нагадують рідини, оскільки не мають геометрично правильного їх розміщення і характеризуються ближнім порядком упорядкування атомів і молекул. Такі тіла називають **аморфними**. Це – віск, скло, різні смоли, пластмаси тощо.



**Кристалічні й аморфні тіла можна розрізнити візуально: аморфні тіла на зламі утворюють поверхню неправильної форми, а кристали – плоскі грані або ступінчасту поверхню.**

Аморфний стан досить нестійкий, і з часом аморфні тіла можуть стати кристалічними. Наприклад, на цукрових льодяниках, аморфних за своїми властивостями, після тривалого зберігання утворюються кристалики цукру. Так само за певних умов кристалічні тіла можуть стати аморфними. Наприклад, швидке охолодження деяких металів спричиняє утворення їх аморфного, так званого склоподібного стану.



**Слово «ізотропний» походить від грец. *isos* – рівний, однаковий; *tropos* – напрям.**

Аморфні тіла мають однакові властивості за різними напрямками міжмолекулярних зв'язків. Тому кажуть, що вони ізотропні. З підви-



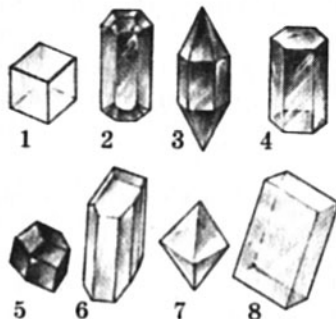
щенням температури вони «м'якшають» і виявляють текучість, проте не мають, як кристалічні тіла, фіксованої температури плавлення.

Кристалічним тілам властивий певний внутрішній порядок розміщення мікрочастинок (атомів, молекул, йонів), з яких вони складаються. За таких умов утворюються **монокристали** різноманітної геометричної форми. Так, монокристал кухонної солі має форму куба, лід – шестигранної призми, алмаз – правильного шестигранника (мал. 4.20). Як правило, вони незначні за розміром, але в природі трапляються й великі монокристали, наприклад брили кварцу в зріст людини.

За природних умов більшість кристалічних тіл складається з маленьких монокристалів, які безладно зрослися. Їх називають **полікристалами**. Прикладом такого полікристалу є сніжинка, яка набуває різних форм, але її крильця, як правило, мають шестикутне спрямування.

Монокристали характеризуються **анізотропією**, тобто залежністю їх властивостей від напрямку орієнтації кристалічних граней. Наприклад, такий природний мінерал, як слюда, легко розшаровується на пластинки вздовж однієї площини, проте виявляє значну міцність у перпендикулярному напрямі. Полікристали – ізотропні за своїми властивостями, оскільки хаотичність орієнтації монокристалів, з яких вони складаються, ліквідує анізотропію їхніх властивостей.

Багато кристалічних тіл, однакових за своїм хімічним складом, мають різні фізичні властивості. Це явище називається **поліморфізмом**. Наприклад, за хімічною природою алмаз і графіт – це карбон у двох різних модифікаціях. Вони мають різні за формою кристалічні ґратки, і тому сили взаємодії між атомами в них різні. Цим пояснюється, зокрема, їхня різна твердість: графіт – м'який, алмаз – твердий мінерал.



Мал. 4.20. Форми ґраток кристалічних тіл

Слово «анізотропний» у перекладі з грец. означає «неоднаковий за напрямом».



У лабораторних умовах отримують біля десяти модифікацій льоду, хоча в природі існує лише одна.

Тверді тіла мають різні механічні властивості. Одні вважаються більш пластичними (мідь, свинець, віск, пластмаси),



іншим більше властива пружність (сталь, гума). Проте цей поділ умовний, оскільки на механічні властивості тіла відчутно впливають зовнішні фактори – температура, тиск, напрям дії сили, наявність тріщин тощо. Так, за низьких температур свинець стає пружним і втрачає свою пластичність, і навпаки, розжарена сталь стає пластичною і легко піддається куванню.

**Урахування пружних і пластичних деформацій є основою конструювання деталей машин, будівництва, обробки матеріалів тощо.**

Крім пружності і пластичності, досить важливими характеристиками твердих тіл є **крихкість і твердість**. Наприклад, скло і кришталі навіть при незначних деформаціях втрачають пружність і руйнуються. Вони чутливі також до ударів і тому вважаються крихкими.

162 **Крихкість залежить від температури тіла. У кожного матеріалу існує критична температура його переходу зі стану пластичної деформації в крихкий.**

При незначних навантаженнях у відносно малих межах крихкості тіла можуть виявляти пружність. Наприклад, під дією вітру віконне скло трохи прогинається, але не б'ється. Разом з тим після удару навіть малого камінця ми збираємо його уламки.

Твердість тіла характеризує одночасно його міцність і пластичність до зовнішніх навантажень. Її визначають методом удавлювання сталюї кульки або алмазної призми в досліджуваній зразок. За глибиною відбитка або його площею під дією певної сили визначають твердість матеріалу. Вона тим більша, чим меншою є глибина чи площа сліду відбитка під дією однакових сил.

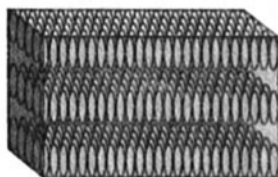
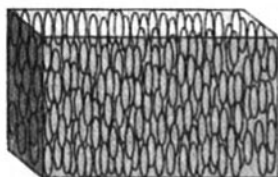
**Інколи твердість матеріалу вимірюють за глибиною подряпини еталонним різцем.**

Механічні властивості твердих тіл залежать від багатьох чинників. Але найсуттєвіший вплив на них мають молекулярна структура тіла, його температура і наявність домішок. Так, найпоширеніша на Землі сполука  $\text{SiO}_2$  залежно від природних модифікацій та домішок може бути звичайним склом, гірським кришталем, кварцом, аметистом, топазом тощо, кожне з яких має особливі механічні властивості.

**Уміст карбону й металів-присадок у сталі визначають її твердість і пружність.**



Знання про механічні властивості твердих тіл широко використовують в інженерії та будівництві, приладобудуванні і металургії, оскільки від їх урахування залежить якість продукції, довговічність роботи машин і механізмів, запобігання техногенним катастрофам.



Мал. 4.21. Рідкі кристали

Кристалічна будова характерна не лише для твердих тіл. Учені виявили, що існують рідини, яким властива анізотропія властивостей, яка притаманна кристалічним утворенням. Їх назвали **рідкими кристалами**. Як правило, вони складаються з молекул органічних сполук, які мають видовжену сигароподібну форму. Оскільки бічна взаємодія таких молекул значно перевищує взаємодію на їх кінцях, вони певним чином упорядковуються, маючи дальній порядок орієнтації молекул (мал. 4.21).

Анізотропія рідких кристалів виявляється в оптичних властивостях, їх залежності від температури, сили струму тощо. Тому через свої специфічні властивості вони набули широкого застосування в сучасній електронній техніці. На їх основі виготовляються дисплеї обчислювальної техніки, електронні термометри, цифрові індикатори та інші прилади.

1. Чому тверді тіла поділяють на кристалічні й аморфні?
2. Які властивості притаманні кристалічним тілам?
3. Як візуально можна відрізнити аморфне тіло від кристалічного?
4. Що таке поліморфізм? Наведіть приклади його прояву.
5. Які механічні властивості характерні для твердих тіл?
6. Чому певні рідини вважають кристалами?



## § 51. Полімери

У природі існує широкий клас органічних і неорганічних речовин, які називаються **полімерами**. Це високомолекулярні сполуки різних груп атомів, які багато разів повторюються, утворюючи довгі макромолекули. Ці речовини бувають твердими і рідкими, аморфними і кристалічними. До класу полімерів належать численні природні сполуки (білки,

нуклеїнові кислоти, каучук тощо) та багато неорганічних сполук, наприклад поліетилен, полістирол, полівінілхлорид (ПВХ), полівінілацетат (ПВА) тощо.

**Перші пластмаси і полімерний матеріал – целулоїд – були отримані наприкінці XIX ст.**

Полімери утворюються з великої кількості так званих мономерів – структурних фрагментів різних атомів, що мають однакову будову (хімічну формулу). Наприклад, мономером полівінілхлориду є хімічний ланцюжок  $\text{CH}_2 - \text{CHCl}$ ,

який багатократно повторюється. Це відбувається завдяки полімеризації (багатократне приєднання мономерів до активних центрів, унаслідок чого утворюється високомолекулярна сполука), поліконденсації (синтез полімеру, що супроводжується виділенням сторонніх продуктів (вода, спирти) або хімічним перетворенням).

Полімери мають особливі фізичні й хімічні властивості, завдяки яким їх широко використовують у різних сферах життя людини. Так, вони можуть бути еластичними під час деформації в широких межах механічних навантажень (гума, каучук), крихкими кристалічними тілами (оргскло і кераміка), гарними термопластичними й електроізоляційними матеріалами тощо. Вони є чудовими розчинниками і ароматизаторами. Їхні властивості можна легко змінювати, оскільки вони мають унікальну гнучку ланцюгову будову і чутливо реагують на дію різних домішок-реагентів навіть у малих концентраціях або заміну одного з хімічних елементів мономера.

**Промислове виробництво синтетичних полімерів почалося в 1906 р. з бакелітової (фенолформальдегідної) смоли.**

Зараз навіть важко уявити сучасне життя без використання полімерів. Завдяки своїм унікальним властивостям на основі цих високомолекулярних сполук сьогодні виготовляють різні волокна й тканини (штучні шкіра й хутро, синтетичні тканини), різні будівельні суміші й матеріали (лінолеум, оздоблювальні панелі, покрівельний матеріал), пластмаси й гуму (труби й шини), поліетиленові плівки для пакувальних пакетів, клеї і фарби тощо. Наприклад, органічне скло, з якого зараз виготовляють лінзи окулярів, є полімером – поліметилметакрилат, а поліестер і нейлон, які використовують у текстильному виробництві, не що інше, як поліамідні тканини.

Промислове виробництво полімерів нині здійснюється двома напрямками: 1) шляхом переробки природних органічних

полімерів у штучні полімерні матеріали; 2) завдяки синтезу полімерів з органічних низькомолекулярних сполук.

Одним з найпоширеніших у світі сьогодні стало виробництво пластмас, які поряд з металами і деревиною нині є основними конструктивними матеріалами. Вони завоювали таку популярність завдяки широкому спектру своїх властивостей, зокрема властивості приймати будь-яку необхідну форму і легко її змінювати за потреби. Серед основних видів пластмас назвемо: пластик (виготовлення смарт-карт), полістирол (корпуси побутових приладів, сантехніка), ацетат целюлози (фотоплівка), поліетиленвінілацетат (кабельна оболонка, взуттєві підбори), тефлон (тверді покриття), поліуретан (поролонові матраци, гальмівні колодки, пакувальний матеріал) тощо.

**В Україні полімерні матеріали виробляють багато підприємств, серед яких найбільшими є концерн «Стірол», фірма «ТАНА», «Полімер» та ін.**



Україна володіє сучасними технологіями виробництва різноманітних полімерних матеріалів. Підприємства органічного синтезу смол, пластмас і хімічних волокон діють в багатьох регіонах нашої країни. Найбільше їх знаходиться там, де є сировинна база й споживачі відповідної продукції, – Донбас і Придніпров'я. Так, у Запоріжжі виготовляють синтетичні смоли, у Дніпродзержинську – полістирол і полівініл, у Северодонецьку – пластмасу і склопластик. Одержані полімерні матеріали потім переробляються на підприємствах Вінниці, Калуша, Києва, Одеси, Рівного, Харкова та інших міст у різноманітну споживчу продукцію.

165

1. Які речовини називаються полімерами?
2. Чому полімерні матеріали отримали таке поширення в різних сферах людського життя?
3. Назвіть відомі вам полімери і вкажіть їхні основні властивості.
4. Де в Україні виробляють полімерні матеріали?



## Вправа 27

1. У порожній закритій посудині об'ємом 500 л залишилося 20 г води за температури 17 °С. Скільки води і пари буде в посудині через деякий час?

2. Чому дорівнює густина насиченої водяної пари за температури 14 °С?

3. У циліндрі під поршнем ізотермічно стискають 0,9 г ненасиченої водяної пари за температури 29 °С. Яким буде об'єм пари, коли почнеться її конденсація?

4. Яка кількість теплоти виділиться при охолодженні 200 г водяної пари, температура якої 100 °С?

5\*. Алюмінієвий калориметр, маса якого дорівнює 50 г, містить 250 г води при температурі 16 °С. Яку кількість стоградусної водяної пари потрібно впустити в калориметр, щоб температура в ньому стала 90 °С?

6. Скільки спирту треба спалити, щоб нагріти 600 г води від температури 15 °С до кипіння і випаровування 0,1 її маси, якщо ККД нагрівника дорівнює 30 %?

7. Нагріту сталюу деталь масою 1,4 кг занурили в 2 кг води при температурі 7 °С, унаслідок чого температура води підвищилася до 17 °С. Якою була температура деталі?

8\*. Воду масою 0,6 кг, температура якої 18 °С, перетворили в лід, випарувавши 240 г аміаку. Визначити ККД холодильної установки.

9\*. У калориметр, у якому було 3 кг води при температурі 20 °С, опустили 0,5 кг льоду, температура якого –10 °С. Визначити температуру, яка встановилася в калориметрі, якщо його теплоємність  $1000 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

10. Відносна вологість повітря при температурі 18 °С становить 45 %. Чому дорівнює точка роси?

11. Відносна вологість повітря в кімнаті при температурі 22 °С дорівнює 60 %. Чи з'явиться роса зі зниженням температури до 16 °С? Яка кількість води сконденсується з кожного кубометра повітря при пониженні температури до 11 °С?

12. У 6 м<sup>3</sup> повітря при температурі 19 °С міститься 51,3 г водяної пари. Визначити відносну вологість повітря.

13\*. Яка енергія вивільняється внаслідок злиття маленьких крапель води радіусом  $2 \cdot 10^{-3}$  мм в одну краплю радіусом 2 мм?

14\*. Соломинка завдовжки 4 см плаває на поверхні води. З одного боку від неї капають мильний розчин. З яким прискоренням почне рухатись соломинка, якщо її маса дорівнює 1 г?

## Головне в розділі 4

У фізиці існує два способи пояснення природи теплових явищ:

- з позицій *термодинамічного підходу*, коли теплоту характеризують за проявами макроскопічних параметрів – тиск, об'єм, температура, густина тощо;

- на основі *молекулярно-кінетичних уявлень* про будову речовини, використовуючи фізичні величини, які характеризують мікроструктуру тіла, – кількість речовини, концентрація частинок, молярна маса тощо.

**Основні положення молекулярно-кінетичної теорії** полягають у тому, що всі речовини складаються з мікрочастинок (атомів, молекул, йонів тощо), які перебувають у хаотичному русі і взаємодіють між собою.

Температуру, яка характеризує тепловий стан тіла, можна вимірювати за різними шкалами, наприклад Цельсія чи Фаренгейта. Проте у фізиці частіше використовують **абсолютну шкалу температур**, яка не залежить від властивостей метричного тіла, і тому її можна вважати ідеальною. Між абсолютною температурою  $T$  і температурою за шкалою Цельсія  $t$  існує зв'язок:

$$T = t + 273.$$

У молекулярно-кінетичній теорії для пояснення властивостей газів використовують модель ідеального газу, завдяки якій можна знехтувати розмірами молекул та їхньою взаємодією.

**Основне рівняння МКТ** відображає співвідношення між тиском і мікропараметрами ідеального газу:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2.$$

167

Для реальних розріджених газів емпірично встановлені газові закони:

*для ізотермічних процесів (закон Бойля–Маріотта)* – за сталої температури тиск  $p$  даної маси газу обернено пропорційний його об'єму  $V$ :

$$p \sim \frac{1}{V};$$

*для ізобаричних процесів (закон Гей-Люссака)* – відношення об'ємів даної маси газу в різних станах дорівнює відношенню абсолютних температур газу в цих станах:

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

*для ізохоричних процесів (закон Шарля)* – відношення тисків даної маси газу в різних станах дорівнює відношенню абсолютних температур газу в цих станах:

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

У загальному вигляді їх відтворює **рівняння стану ідеального газу**: для даної його маси ( $m = \text{const}$ ) справджується співвідношення:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

яке для довільної кількості речовини набуває вигляду **рівняння Менделєєва–Клапейрона**:

$$pV = \frac{m}{M}RT.$$

Таким чином, термодинамічний і молекулярно-кінетичний підходи до розкриття сутності теплових явищ не суперечать, а взаємно доповнюють один одного. Відносна простота опису теплових явищ за допомогою параметрів, які легко виміряти, доповнюється і підкріплюється глибиною теоретичного обґрунтування і пояснення їх природи з позицій внутрішньої будови речовини. Таке поєднання двох способів опису теплових явищ і процесів підкреслює вірогідність їх висновків і узагальнень.

Молекулярна фізика тлумачить різноманітні фізичні явища, ґрунтуючись на атомно-молекулярних уявленнях про будову речовини. Зокрема, це стосується пояснення властивостей газів, рідин і твердих тіл під час переходу речовини з одного агрегатного стану в інший.

Випаровування або утворення пари супроводжується поглинанням теплоти. Залежно від умов існування пари вона може бути **насиченою**, тобто такою, що знаходиться в динамічній рівновазі з власною рідиною, і **ненасиченою**. Насичена і ненасичена пара мають різні властивості.

Рівень насичення атмосферного повітря водяною паром характеризується **відносною вологістю**:

$$\varphi = \frac{P}{P_n} 100 \%.$$

Взаємодією молекул рідин пояснюються деякі властивості рідин, що виявляються ними на межі з твердими тілами й газами. Якщо при контакті з твердими тілами молекули рідин мають слабку взаємодію, то кажуть про **незмочування** рідиною поверхні твердого тіла, і навпаки, при значній їх взаємодії відбувається **змочування**. Змочування і незмочування рідин проявляється, зокрема, в капілярних явищах.

На межі з газами рідини утворюють вільну поверхню, яка за своїми властивостями нагадує плівку, уздовж поверхні якої діють сили поверхневого натягу, які намагаються скоротити площу поверхні. Поверхневий шар рідин має надлишок потенціальної енергії, який характеризує величина **поверхневого натягу**:

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

Тверді тіла за особливостями внутрішньої будови поділяють на **кристалічні** та **аморфні**. Кристалічні тіла мають фіксовану



температуру плавлення, характеризуються анізотропією (для монокристалів) і поліморфізмом. Механічні властивості твердих тіл (пружність, пластичність, твердість тощо) зумовлені різновидом кристалічної ґратки, яку утворюють мікрочастинки речовини (атоми, молекули, йони), і силою взаємодії між ними.

У природі існують органічні і неорганічні речовини, утворені з високомолекулярних сполук, які називаються полімерами. Завдяки особливим властивостям полімерів вони дедалі ширше застосовуються як конструкційні матеріали в різних сферах життя сучасної людини.

# Розділ 5



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

- імена вчених, які зробили вагомий внесок у розвиток теорії теплоти;
- перший закон термодинаміки та висновки, що випливають з нього;
- фізичні величини, що характеризують термодинамічні процеси (кількість теплоти, внутрішня енергія, робота);
- способи зміни внутрішньої енергії тіл;
- будову теплових двигунів, холодильника.

Ви зможете **пояснити**:

- необоротність теплових процесів;
- можливі шляхи вивільнення, перетворення та використання внутрішньої енергії;
- принцип дії теплових двигунів і холодильника;
- екологічні проблеми, пов'язані з вивільненням і використанням теплової енергії;
- прояви першого закону термодинаміки в природі.

Ви будете **здатні**:

- наводити приклади застосування теплових машин;
- розрізняти теплообмін і виконання роботи в теплових процесах, конструктивні елементи теплових машин;
- розв'язувати задачі, застосовуючи перший закон термодинаміки;
- оцінювати екологічні наслідки використання теплових двигунів у суспільному житті.

# ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

171

## § 52. Термодинамічні системи і макропараметри стану речовини

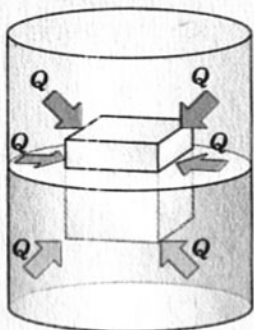
Термодинамічний підхід ґрунтується на понятті **термодинамічної системи**, під якою розуміють будь-яке макроскопічне тіло або сукупність таких тіл. Стан термодинамічної системи визначається її внутрішніми параметрами, наприклад станом руху мікрочастинок, з яких складається тіло. Так, тепловий стан тіла, який характеризується температурою, тісно пов'язаний зі швидкістю руху атомів і молекул – *чим більша швидкість їх руху, тим вища температура тіла.*

**Температура тіла залежить від швидкості руху атомів і молекул, з яких воно складається, – чим швидкість більша, тим вища температура.**



Внутрішній стан будь-якого тіла досить важко визначати через параметри руху мікрочастинок, оскільки їх дуже багато. Тому, щоб спростити опис стану термодинамічної системи, його пов'язують з фізичними величинами, які характеризують тіло загалом, незалежно від його молекулярної будови. До таких величин належать, зокрема, маса, об'єм, густина, тиск, температура тощо. Їх називають **макропараметрами термодинамічної системи**. Фактично вони є усередненими значеннями цих фізичних величин упродовж тривалого часу.

Температура – один з основних макропараметрів термодинамічної системи, що характеризує стан її теплової, або термодинамічної, рівноваги. Суть цього поняття пояснюється перебігом теплових явищ і процесів.



Мал. 5.1. Теплообмін шматочка льоду в склянці води

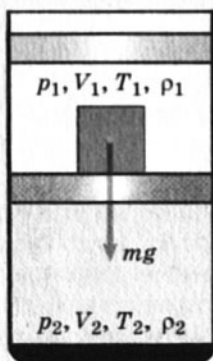
Так, з власного досвіду нам відомо, що більше нагріті тіла віддають теплоту менше нагрітим, унаслідок чого із часом їх температури стають однаковими. Якщо, наприклад, шматочок льоду кинути в склянку з теплою водою (мал. 5.1), то лід буде танути, а вода в склянці охолоджуватися, віддаючи певну кількість теплоти на танення льоду. Крім того, склянка з водою і лід перебувають у теплообміні з навколишнім середовищем. Тому із часом температури всіх цих тіл вирівнюються.

172



**Тіла з вищою температурою віддають теплову енергію тілам з нижчою температурою; теплообмін відбувається доти, доки їхні температури не вирівнюються.**

Таким чином, із часом у термодинамічних системах унаслідок теплообміну настає стан термодинамічної рівноваги, коли температури всіх тіл стають однаковими й теплообмін між ними припиняється. Значення температури характеризує цілком певний стан теплової рівноваги термодинамічної системи, у якій вона перебуває в даний момент.



Мал. 5.2. Зміна макропараметрів газу в циліндрі

Він може бути змінений в результаті термодинамічного процесу.

Якщо на поршень у циліндрі з газом покласти вантаж (мал. 5.2), то об'єм газу змінюватиметься доти, доки тиск газу не зрівняється із зовнішнім тиском. Тобто термодинамічна система «циліндр-газ» перейде в інший стан, який характеризуватиметься новими значеннями макропараметрів – тиском  $p_2$ , об'ємом  $V_2$ , температурою  $T_2$ , густиною  $\rho_2$ . Такий перехід термодинамічної системи з одного стану в інший, коли параметри системи із часом змінюються, називається **термодинамічним процесом**.

Термодинаміка розглядає в основному стани термодинамічної рівноваги і процеси, які відбуваються досить повільно, і тому кожний новий їхній стан можна вважати рівноважним. У стані термодинамічної рівноваги між макропараметрами системи існують певні функціональні залежності, які відтворюються рівняннями стану термодинамічної системи.

1. Що називається термодинамічною системою?
2. Які фізичні величини відносять до макропараметрів термодинамічної системи?
3. Яка фізична величина характеризує термодинамічну систему в стані теплової рівноваги?
4. Що відбувається між тілами, які мають різну температуру й перебувають у контакті? У якому «напрямі» відбувається цей процес?
5. Що називається термодинамічним процесом? Наведіть приклади термодинамічних процесів.



## § 53. Внутрішня енергія тіла

173

Будь-яке макроскопічне тіло має енергію, яка зумовлена його мікростаном. Ця енергія називається внутрішньою (позначається  $U$ ). Вона дорівнює енергії всіх мікрочастинок речовини, з яких складається тіло. Так, внутрішня енергія ідеального газу складається з кінетичної енергії всіх його молекул, оскільки їхньою взаємодією в даному випадку можна знехтувати.

**Модель ідеального газу передбачає, що молекули перебувають на відстані кількох діаметрів одна від одної. Тому енергія їхньої взаємодії набагато менша від енергії руху і нею можна знехтувати.**



У реальних газів, рідин і твердих тіл взаємодію мікрочастинок (атомів, молекул, йонів тощо) слід ураховувати, оскільки вона сумірна з кінетичною енергією. Тому вона суттєво впливає на їхні властивості. У такому разі їхня внутрішня енергія складається з кінетичної енергії теплового руху мікрочастинок і потенціальної енергії їхньої взаємодії.

Щоб змінити внутрішню енергію тіла, треба фактично змінити або кінетичну енергію теплового руху мікрочастинок, або потенціальну енергію їхньої взаємодії (або і ту й іншу разом). Багатовіковий досвід людства переконує в тому, що це можна зробити двома способами – або в процесі теплообміну, або

завдяки здійсненню роботи. У першому випадку це відбувається внаслідок передачі певної кількості теплоти  $Q$ ; у другому випадку – у результаті виконання роботи  $A$ .



**Зміна внутрішньої енергії може відбуватися за рахунок наданої чи отриманої тілом теплоти або внаслідок виконання роботи:**

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

Таким чином, надання кількості теплоти й виконання роботи є чинниками, завдяки яким можна змінити внутрішню енергію тіла:

$$\Delta U = Q + A. \quad (1)$$

Якщо відбувається лише теплообмін, то кількість теплоти, надана тілу чи отримана ним, повністю іде на зміну його внутрішньої енергії, зокрема кінетичної енергії атомів і молекул:  $\Delta U = Q$ . Під час нагрівання чи охолодження тіла вона дорівнює:

$$\Delta U = Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T. \quad (2)$$

Під час плавлення чи кристалізації твердих тіл внутрішня енергія змінюється за рахунок потенціальної енергії взаємодії мікрочастинок, адже відбувається структурна перебудова речовини. У такому разі зміна внутрішньої енергії дорівнює теплоті плавлення (кристалізації) тіла:

$$\Delta U = Q_{\text{пл}} = \lambda m, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – питома теплота плавлення (кристалізації) твердого тіла.



**Якщо зміна внутрішньої енергії відбувається внаслідок теплообміну, то**

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q = cm(T_2 - T_1), \\ \text{або } \Delta U &= Q_{\text{пл}} = \lambda m, \\ \text{або } \Delta U &= Q_{\text{н}} = rm. \end{aligned}$$

Випаровування рідин або конденсація пари також викликає зміну внутрішньої енергії, яка дорівнює теплоті пароутворення:

$$\Delta U = Q_{\text{н}} = rm, \quad (4)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення (конденсації) рідини.

Зміна внутрішньої енергії тіла внаслідок виконання механічної роботи (без теплообміну) дорівнює значенню цієї роботи:  $\Delta U = A$ .

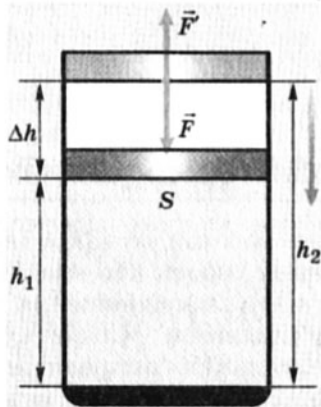
Отже, з погляду молекулярної фізики, внутрішня енергія тіла є сумою кінетичної енергії теплового руху атомів, молекул

чи інших частинок, з яких воно складається, і потенціальної енергії взаємодії між ними. Це енергія термодинамічної системи, яка залежить від її внутрішнього стану. Тому обчислюють зміну внутрішньої енергії  $\Delta U$ , яка відбувається внаслідок теплопередачі й виконання роботи.

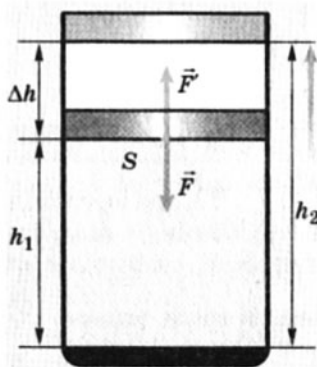
1. Від яких макропараметрів системи залежить внутрішня енергія ідеального газу?
2. Які макропараметри загалом визначають внутрішню енергію тіла?
3. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії, якщо відбувається лише теплообмін?
4. Яким чином виконана механічна робота впливає на внутрішню енергію тіла?
5. Яке тлумачення дають внутрішній енергії молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка?

## § 54. Робота газу

Обчислення виконаної роботи в термодинаміці пов'язують з макропараметрами системи. Розглянемо газ, який міститься в циліндрі під поршнем площею  $S$  (мал. 5.3).



Мал. 5.3. Робота газу при зменшенні об'єму



Мал. 5.4. Робота газу при збільшенні об'єму

Нехай на газ діє поршень, змушуючи його стискатися. Під дією сили  $F$  поршень зміщується вниз на висоту  $\Delta h = h_2 - h_1$ , виконуючи роботу  $A = F\Delta h$  (напрямок дії сили збігається з напрямком переміщення, тому  $\cos\alpha = 1$ ). Якщо переміщення поршня буде незначним, то тиск газу можна вважати незмінним ( $p = \text{const}$ ). Ураховуючи, що за третім законом Ньютона сила  $F$

за модулем дорівнює силі тиску газу  $F'$ , а  $S\Delta h = \Delta V$  – це зміна об'єму газу, маємо:

$$A = pS(h_2 - h_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

Оскільки  $V_2 < V_1$ , отже,  $\Delta V < 0$ , то робота зовнішніх сил над газом дорівнюватиме:

$$A = -p\Delta V. \quad (1)$$

Якщо під дією сили тиску  $F'$  газ розширюється (мал. 5.4), тобто сам виконує роботу  $A' = pS(h_2 - h_1)$ , то її значення також дорівнює  $p\Delta V$ . Виконана газом робота додатна, оскільки  $V_2 > V_1$  і  $\Delta V > 0$ :

$$A' = p\Delta V. \quad (2)$$

При незначних змінах об'єму й сталому тиску формули (1) і (2) справедливі не лише для газів, а й для інших термодинамічних систем. Оскільки зміна об'єму за сталого тиску супроводжується зміною температури тіла, то можна зробити висновок, що виконання роботи в термодинаміці викликає зміну стану тіла, адже змінюються його температура  $T$  і об'єм  $V$ .

176



1. Чому робота газу і робота зовнішніх сил над газом відрізняються за знаком?
2. Які макропараметри системи змінюються під час виконання роботи?

## § 55. Перший закон термодинаміки

Те, що внутрішню енергію системи можна змінити двома способами – завдяки виконанню роботи або внаслідок теплопередачі, спонукало вчених шукати співвідношення між



**Перший закон термодинаміки є відтворенням закону збереження енергії.**

цими величинами. Спочатку у 1842 р. німецький природодослідник Р. Майєр теоретично встановив, а згодом у 1843 р. англійський учений Дж. Джоуль експеримен-

тальним шляхом виміряв еквівалентність значень кількості теплоти і роботи. За їхніми результатами було зроблено узагальнення щодо збереження енергії в природі: *енергія в природі не виникає з нічого і не зникає безслідно; вона лише переходить з однієї форми в іншу.*

Пізніше цей фундаментальний закон природи набув логічної форми **першого закону термодинаміки**: *перехід термодина-*



*мічної системи з одного стану в інший характеризується зміною її внутрішньої енергії, яка дорівнює сумі роботи зовнішніх сил і кількості теплоти, наданої системі:*

$$\Delta U = A + Q. \quad (1)$$

У будь-якому стані тіло має певну внутрішню енергію. Проте неправильно буде стверджувати, що воно має певну кількість теплоти чи роботи. Незалежно від того, яким із цих способів відбувається зміна стану тіла, цей стан однозначно визначає внутрішня енергія. Так, газ може нагрітися за рахунок надання йому певної кількості теплоти або внаслідок виконання зовнішніми силами роботи (наприклад, стискання газу). Проте не можна однозначно відповісти, завдяки якому процесу – виконанню роботи чи теплопередачі – відбулося нагрівання газу.

Якщо система сама виконує роботу ( $A = -A'$ ), то перший закон термодинаміки набуває іншого вигляду:

$$Q = \Delta U + p\Delta V, \quad (2)$$

тобто надання термодинамічній системі певної кількості теплоти спричиняє зміну її внутрішньої енергії або виконання нею роботи, чи того й іншого одночасно.

177

**Ще в 1775 р. Французька академія наук прийняла рішення не розглядати проекти вічних двигунів.**

Останнє формулювання важливе з точки зору заперечення можливості вічного двигуна: *не можна створити машину, яка б необмежено виконувала роботу, не отримуючи енергію ззовні.* Адже, якщо кількість теплоти  $Q = 0$ , то  $A' = -\Delta U$ , тобто робота виконується за рахунок зменшення внутрішньої енергії, яка не безмежна.

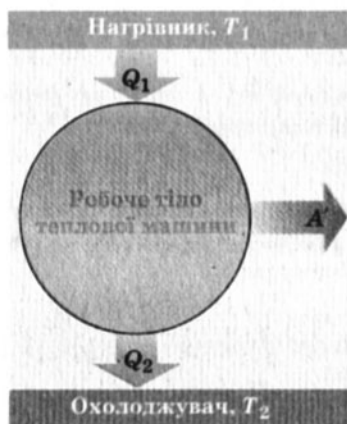
1. Який внесок Р. Майєра і Дж. Джоуля в розвиток термодинаміки?
2. Наслідком якого фундаментального закону природи є перший закон термодинаміки? Сформулюйте його.
3. Який важливий наслідок випливає з першого закону термодинаміки?

## § 56. Теплові двигуни

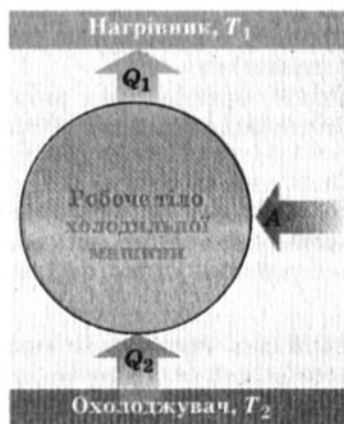
Людство навчилося використовувати теплову енергію, створивши теплові машини й двигуни. В основу їхньої дії покладено виконання механічної роботи за рахунок теплоти,

яку вони отримують від нагрівача й частину якої віддають охолоджувачу.

Принцип дії теплової машини можна подати схематично (мал. 5.5). Нагрівач передає робочому тілу певну кількість теплоти  $Q_1$ , частина якої йде на виконання роботи  $A'$ . Робочим тілом у теплових машинах може бути газ або пара, які виконують роботу під час свого розширення внаслідок нагрівання. У парових турбінах це відбувається завдяки паровим котлам, у двигунах внутрішнього згоряння – внаслідок згоряння паливної суміші, у реактивних двигунах – завдяки значній тепловіддачі палива під час стрімкого згоряння.



Мал. 5.5. Принцип дії теплової машини



Мал. 5.6. Принцип дії холодильної машини

Виконуючи роботу, робоче тіло віддає певну частину кількості теплоти  $Q_2$  охолоджувачу (спеціальним пристроєм або навколишньому середовищу), знижуючи свою температуру до  $T_2$ . Воно не може використати всю надану їй теплову енергію, оскільки частина її розсіюється в атмосфері внаслідок викидів відпрацьованої пари або вихлопних газів.

За законом збереження енергії значення виконаної роботи  $A' = Q_1 + Q_2 = |Q_1| - |Q_2|$ . За означенням коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}.$$

Отже, коефіцієнт корисної дії теплової машини завжди менший за 1 (часто його обчислюють у відсотках). Наприклад, у двигунів внутрішнього згоряння він дорівнює близько 44 %, у парових турбін – до 40 %.

Коефіцієнт корисної дії дорівнює відношенню величини виконаної роботи до затраченої енергії:

$$\eta = \frac{A}{Q}$$



Тепловою машиною є також холодильник, принцип дії якого ґрунтується на оборотності циклу теплової машини. Холодильна машина працює як тепловий насос: вона передає теплоту від холодного тіла до більше нагрітого (мал. 5.6). Це не суперечить законам термодинаміки, оскільки охолодження відбувається за рахунок виконання роботи.

Щоб холодильну машину привести в дію, необхідно над робочим тілом виконати роботу. Тоді нагрівачу передаватиметься більша кількість теплоти, ніж відбирається в охолоджувача:  $|Q_1| = |Q_2| + A$ . Таким чином, температура охолоджувача  $T_2$  буде ще більше знижуватися, а температура нагрівача  $T_1$  підвищуватиметься.

Ефективність холодильної машини характеризується відношенням кількості теплоти  $Q_2$ , відібраної в тіла, до виконаної

при цьому роботи  $A$ :  $\varepsilon = \frac{Q_2}{A}$ . Цей коефіцієнт може бути більшим від 1. Він залежить від різниці температур нагрівача  $T_1$  і охолоджувача  $T_2$ .

У реальних холодильників коефіцієнт  $\varepsilon$  може наближатися до 3.



1. Який принцип дії теплової машини? Які обов'язкові складові вона має?
2. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії теплової машини? Чи може він бути більшим за 1?
3. За яким принципом працює холодильна машина? У чому її відмінність від теплової машини?
4. Що характеризує ефективність холодильної машини?



## Вправа 28

1. Газ об'ємом  $6 \text{ м}^3$  перебуває під тиском  $1,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Яка робота виконана під час ізобаричного його нагрівання від  $285 \text{ К}$  до  $360 \text{ К}$ ?

2. У циліндричній посудині під поршнем міститься  $2,5 \text{ г}$  водню при температурі  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Визначити роботу, яку виконує газ під час ізобаричного нагрівання до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Обчислити роботу, яку виконує водень під час ізобаричного розширення до вдвічі більшого об'єму, якщо його початкова температура дорівнює  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  і маса  $6,5 \text{ г}$ .

4. Повітря об'ємом 20 л міститься в циліндрі за температури 300 К під тиском  $2,8 \cdot 10^5$  Па. Якою стане температура повітря, якщо при ізобаричному його нагріванні була виконана робота 760 Дж?

5\*. За один цикл ідеальна теплова машина виконує роботу 15 Дж. Яка кількість теплоти передається холодильнику при цьому, якщо ККД машини дорівнює 30 %.

## Головне в розділі 5

В основу термодинамічного підходу покладено опис термодинамічної системи за допомогою макропараметрів, які легко виміряти, – температура ( $T$ ), тиск ( $p$ ), об'єм ( $V$ ), маса ( $m$ ) тощо.

Внутрішня енергія тіла дорівнює енергії всіх мікрочастинок речовини, з яких складається тіло. Її можна змінити внаслідок теплообміну або виконання роботи. **Кількість теплоти**, передана тілу (або забрана у нього), визначається залежно від теплового процесу, що супроводжує його:

*при нагріванні (охолодженні)*

$$Q = ct\Delta T;$$

*при плавленні (кристалізації)*

$$Q = \lambda m;$$

*при пароутворенні (конденсації)*

$$Q = gm.$$

**Робота газу при сталому тиску** ( $p = \text{const}$ ) дорівнює:  $A' = p\Delta V$  і змінює знак на протилежний при виконанні роботи зовнішніми силами над газом:

$$A = -p\Delta V.$$

**Перший закон термодинаміки** встановлює, що *кількість теплоти, надана термодинамічній системі, спричиняє зміну її внутрішньої енергії або виконання роботи, чи спричинює те й інше одночасно:*

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

Він є відтворенням фундаментального закону збереження енергії, який заперечує можливість створення вічного двигуна: *не можна створити машину, яка б необмежено виконувала роботу, не отримуючи енергію ззовні.*

Закони термодинаміки мають широке практичне застосування, зокрема в техніці, у конструюванні теплових машин. Усі теплові машини (двигуни внутрішнього згорання, реактивні двигуни, парові й газові турбіни, холодильні машини тощо) побудовані за принципом виконання механічної роботи за рахунок внутрішньої енергії. Їхній ККД завжди менший від 1 і дорівнює:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}.$$

## Віговігі до вправ

### Вправа 1.

1. 25 м; 35 м. 2. 2 км; 9,28 км. 3. 25 км; 5 км; 15 км; -5 км. 4. 54 км/год.  
5. 72 с. 6. -4 м/с; протилежний до обраного напрямку осі  $OX$ .

### Вправа 2.

1. 10 с; 50 м. 2. 40 с; 400 м і 240 м; 35 с і 45 с. 3.  $x_1 = 100 - t$ ,  $x_2 = 2(t - 10)$ ; 1 м/с, 2 м/с; 40 с; 60 м; 40 м. 4. -20 м; 40 м; -40 м.

### Вправа 3.

1. 4 м/с під кутом  $60^\circ$  до берега. 2. 9 км/год; 1 км/год. 4. 175 м.

### Вправа 4.

1. 0,21 м/с<sup>2</sup>. 2. 12 м/с. 3. 0,5 м/с<sup>2</sup>; 20 с; 100 м. 4. 2,5 м/с; 12,5 м/с.  
5. 10 м/с<sup>2</sup>; 2 с. 6. 38 м. 7. 20 с; 60 м; 70 м. 8. 2 м/с<sup>2</sup>;  $v = -8 + 2t$ ; -8 м;  
6,45 с і 1,55 с.

### Вправа 5.

1.  $x_{OA} = 0,5t^2$ ,  $x_{AB} = 2 + 2t$ ;  $x_{BC} = 8 - t^2$ ; 4 м, 6 м; 1,5 м/с, 1 м/с;  $v_0 = 0$ ,  
 $v_A = 2$  м/с,  $v_B = 2$  м/с,  $v_C = 0$ ,  $v_D = -2$  м/с. 2. 46 м.

### Вправа 6.

1. 31,25 м; 25 м/с. 2. -5 м/с; 11,25 м, 8,75 м; 10 м; 1 с. 3. 6 с; 180 м.  
4. 1,2 м. 5. 40 м. 7. 0,11 с.

### Вправа 7.

1. 100 об/с. 2. 3,2 об/с; 0; 5 м/с; 10 м/с. 3. 4,2 об/с. 4. 7,8 км/с; 9,1 м/с<sup>2</sup>.

### Вправа 8.

1.  $\approx 6$  м/с. 2. Маси візків однакові. 3. 30 см/с.

### Вправа 9.

а) 0,25 м/с<sup>2</sup>; б) 0,5 Н; г) 6 м.

### Вправа 10.

1. 6 кН, 4 кН. 2. 2 с. 3.  $\approx 2 \cdot 10^{20}$  Н. 4.  $\approx 3 \cdot 10^{-7}$  Н.

### Вправа 11.

2. 0,3 м. 3. а) 40 см; б)  $\approx 33$  Н/м.

### Вправа 12.

1.  $\approx 66$  Н. 2. 0,5.

### Вправа 13.

1. 0,2. 2. 64 000 км.

### Вправа 14.

1. 0,5 м/с<sup>2</sup>. 2. 2 м/с<sup>2</sup>; 10 м/с; 2000 Н. 3.  $\frac{g}{3}$ ;  $\frac{4mg}{3}$ ;  $\frac{4mg}{3}$ ;  $\frac{8mg}{3}$ . 4.  $\frac{g}{5}$ ;  $\frac{3g}{10}$ ;

$\frac{12mg}{5}$ . 5.  $-2 \text{ м/с}^2$ ; 20 кг;  $-4 \text{ м/с}$ . 6. 20 м/с. 7.  $60^\circ$ . 8. 19 м/с;  
 $68^\circ$  ( $\text{tg } \alpha = 2,5$ ). 9. а)  $a_1 = a_2 = 0,1 \text{ м/с}^2$ ; б)  $a_1 = 1 \text{ м/с}^2$ ;  $a_2 = 0,3 \text{ м/с}^2$ .

**Вправа 15.**

1. 17 см праворуч від центра стержня. 2. 350 Н; 1050 Н. 3. 11 250 Н;  
 38 750 Н.

**Вправа 16.**

1. 250 Н. 2.  $\frac{mg}{2}$ . 3. Палицю треба покласти на відстані  $\frac{l}{4}$  від ближчого  
 кінця балки. 4.  $\frac{R}{6}$  зліва від центра круга.

**Вправа 17.**

4. Перетягне ліва частина стержня. Центр мас стержня знаходиться  
 на відстані  $\frac{l}{16}$  зліва від підвісу.

**Вправа 18.**

1.  $5,04 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ . 2. 0,044 м/с. 3. 5,5 м/с. 4. 0,04 м/с.

**Вправа 19.**

1. 20 м/с. 2. 200 м/с. 3. 6250 Н. 4. 1470 м.

**Вправа 20.**

1. 200 Дж. 2. 2800 Дж. 3. Ні. 4. 45 кДж.

**Вправа 21.**

1. 3200 Дж; 56,6 м/с. 2.  $\sqrt{2}$ . 3. 12 кг. 4. 3,6 кДж.

**Вправа 22.**

1.  $-5 \text{ Дж}$ ;  $+5 \text{ Дж}$ ; 0. 2.  $+15 \text{ Дж}$ ;  $-45 \text{ Дж}$ ; 0. 3. 60 Дж; 15 Дж. 4. 15 кДж.  
 5. 10 Дж. 6. 250 Дж.

**Вправа 23.**

3. 50 Дж. 5.  $0,24 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

**Вправа 24.**

1. 80 Дж; 80 Дж; 80 Дж. 2. 40 м/с; 2 кг. 3. 50 Дж. 4. 28,125 Дж; 11,25 м.  
 5.  $11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . 6. 18 м/с. 7. 5 Дж. 8. 200 м. 9. 206,16 м.

**Вправа 25.**

1. 0,6 с. 2.  $v/c = 0,99989$ .

**Вправа 26.**

1.  $4,4 \cdot 10^{22}$  молекул. 2.  $7,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . 3.  $2,7 \cdot 10^{25}$  молекул. 4. Атомів  
 води більше в 2,45 раза. 5. 5 діб. 6. 15,7 г. 7.  $1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . 8. 3,3 см.  
 10.  $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . 11.  $2 \cdot 10^{23}$  молекул кисню. 12.  $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . 13.  $4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

14.  $1,28 \text{ кг/м}^3$ . 15.  $8,1 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$ . 16.  $15,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . 17. Об'єм водню в 14 разів більший за об'єм азоту. 18. У кімнаті  $1,25 \cdot 10^{27}$  молекул, у склянці  $6,7 \cdot 10^{24}$  молекул води.

**Вправа 27.**

1. 12,8 г води і 7,2 г насиченої пари. 2.  $12 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ . 3. 0,031 м<sup>3</sup>. 4. 460 кДж. 5. 34,6 г. 6. 40 г. 7. 126 °С. 8. 74 %. 9. 6,1 °С. 10. 6 °С. 11. Ні; 1,6 г. 12. 52 %. 13.  $3,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$ . 14.  $1,3 \text{ м/с}^2$ .

**Вправа 28.**

1.  $3 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ . 2. 760 Дж. 3. 8,1 кДж. 4. 340 К. 5. 35 Дж.



## Алфавітний покажчик

---

### А

- Абсолютна температура 144
- Абсолютний нуль температури 145
- Алгоритм розв'язування задач із кінематики 22
  - з динаміки 78
- Арістотель 13, 89
- Армстронг Ніл 108
- Архімед 89

### В

- Вага 64, 79
- Важки на блоці (задача) 85
- Взаємодія гравітаційна 63
  - електромагнітна 62, 135
- Взаємозв'язок маси і енергії 130
- Відносність кінетичної енергії
  - руху 16, 29
  - спокою 16
- Вільне падіння 42
- Вологість повітря 152

### Г

- Гагарін Юрій Олексійович 108
- Галілео Галілей 13, 53, 124
- Графік руху тіла 26, 39
  - прискорення 38
  - проекції переміщення 25, 38
  - швидкості 25, 38
  - шляху 25, 38
- Гук Роберт 68

### Д

- Двигун тепловий 178
- Динаміка 53
- Дія сили пружності 68
  - тяжіння 64, 79

### Е

- Ейнштейн Альберт 13, 53, 125, 135
- Енергія 112
  - внутрішня 173
  - кінетична 114
  - повна механічна 118
  - потенціальна 115
- Еталон кілограма 58
- Етапи розв'язування фізичних задач 21, 75

---

### З

- Закон всесвітнього тяжіння 63  
– Бойля–Маріотта 139  
– Гей–Люссака 142  
– додавання швидкостей 30, 49  
– – і перетворення механічної енергії 118  
– другий Ньютона 59, 103  
– збереження імпульсу 104  
– перший Ньютона 54  
– термодинаміки перший 177  
– третій Ньютона 61  
– Шарля 148

### I

- Ідеальний газ 138  
Изобара 143  
Ізотерма 139  
Ізохора 148  
Імпульс тіла 59, 103

### К

- Каденюк Леонід Костянтинович 109  
Камера згоряння 106  
Кибальчич Микола Іванович 107  
Кілограм 7, 58  
Кількість речовини 136  
Кількість руху 59  
Кінематика 14, 49  
Коефіцієнт  
– корисної дії 178  
– тертя ковзання 71, 73  
Кондратюк Юрій Васильович (справжнє ім'я Шаргей Олександр Гнатович) 108  
Корольов Сергій Павлович 108  
Космічні станції 109  
Космос 108  
Кутове переміщення 46

### М

- Маріотт Едм 139  
Маса молярна 137  
Маса тіла 57  
Матеріальна точка 15, 46  
Механіка 13  
Механічні властивості тіл 162  
Момент сили 92

### Н

- Нульовий рівень енергії 115  
Ньютон 59  
Ньютон Ісаак 13, 53, 124

## О

- Обертота частота 46
- Одиниця маси 7, 58
- Однорідність простору 126
  - часу 128
- Основна задача механіки 13
- Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) 138
- Основні положення МКТ 134
- Особливості розв'язування задач динаміки 76

## П

- Пара насичена 151
  - ненасичена 152
- Пароутворення 151
- Переміщення 18, 29
- Період обертання 46
- Поверхнева енергія 157
- Поверхневий натяг 157
- Повна енергія 118
- Полімери 163
- Потенціальна енергія 115
- Потужність 112
- Похибка вимірювання 8
- Принцип відносності Галілея 124
- Принципи СТВ 125
- Прискорення 32
- Прискорення вільного падіння 43, 50
- Психрометр 156

## Р

- Ракета 106
- Реактивний двигун 106
  - рух 105
- Рівновага важеля 89
- Рівняння Менделєєва-Клапейрона 149
- Рівняння стану ідеального газу 147
- Робота газу 176
  - механічна 110
  - сили пружності 117
  - тяжіння 116
- Розкладання сил 9, 57
- Рух
  - криволінійний 16, 32
  - механічний 16, 49
  - по колу 45, 49, 86
  - прямолінійний 16, 32
  - реактивний 105
  - рівномірний прямолінійний 20, 25, 49
  - рівноприскорений 32, 49

---

## С

### Сила

- пружності 63, 68, 80
- реакції опори 64, 72
- тертя 71
- тяжіння 64

### Система ізольована 102

- відліку 15, 49, 127
- замкнута 102
- інерціальна 54
- нерухома 30, 49, 127
- рухома 30, 49, 127

### Спеціальна теорія відносності (СТВ) 124

### Спокій 16

### Стала Авогадро 136

## Т

### Температура 172

### Типи задач динаміки 75-79

### Тиск парціальний 153

### Тіло аморфне 160

- кристалічне 160

### Тіло відліку 14

### Точка роси 154

### Траєкторія 16, 47

### Трикутник Стевіна 95

### Тягарці на блоці 81, 85

## У

### Умова рівноваги тіл 92

## Ц

### Центр інерції 97

- мас 97
- тяжіння 97

### Ціолковський Костянтин Едуардович 108

## Ч

### Частота обертова 46

## Ш

### Швидкість лінійна 47

- кутова 47
- світла 125
- тіла 20, 32

### Шлях 18, 33

### Штучні супутники зв'язку 108

## Я

### Янгель Михайло Кузьмич 108

<i>Дорогий друже!</i> .....	3
Вступ. Навіщо і як вивчати фізику .....	4
Фізичні величини. Одиниці фізичних величин .....	6
Вимірювання. Похибки вимірювання .....	7
Математика – мова фізики .....	9
Наближені обчислення .....	10

## **Розділ 1. Кінематика**

§ 1. Механічний рух. Траєкторія руху .....	14
§ 2. Шлях і переміщення .....	18
§ 3. Рівномірний прямолінійний рух .....	20
§ 4. Як розв'язувати задачі кінематики .....	21
§ 5. Графіки рівномірного прямолінійного руху .....	24
☞ § 6. Приклади розв'язування задач .....	26
§ 7. Відносність руху. Закон додавання швидкостей .....	29
§ 8. Рівноприскорений рух. Прискорення .....	32
☞ § 9. Приклади розв'язування задач .....	35
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення прискорення тіла під час рівноприскореного руху</i> .....	36
§ 10. Графіки рівноприскореного руху .....	38
☞ § 11. Приклади розв'язування задач .....	40
§ 12. Вільне падіння тіл. Прискорення вільного падіння.....	42
☞ § 13. Приклади розв'язування задач .....	44
§ 14. Рух точки по колу .....	45
Головне в розділі 1 .....	50

## **Розділ 2. Динаміка**

§ 15. Перший закон механіки Ньютона. Інерціальні системи відліку .....	54
§ 16. Сила. Додавання сил. Маса .....	56
§ 17. Другий закон механіки Ньютона .....	59
§ 18. Третій закон механіки Ньютона .....	61
§ 19. Гравітаційні сили. Закон всесвітнього тяжіння .....	63
<i>Лабораторна робота № 2. Вимірювання сил</i> .....	66
§ 20. Сила пружності .....	68
§ 21. Сила тертя .....	71
☞ § 22. Як розв'язувати задачі динаміки .....	75
§ 23. Основи статички. Рівновага важеля .....	88
§ 24. Умови рівноваги тіл. Стійка і нестійка рівновага ....	91

§ 25. Приклади розв'язування задач на рівновагу важеля .....	93
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження рівноваги тіла під дією кількох сил .....</i>	96
§ 26. Центр тяжіння (центр мас) .....	98
§ 27. Закони збереження в механіці. Замкнута система ...	101
§ 28. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу .....	102
§ 29. Реактивний рух .....	104
§ 30. Освоєння космосу .....	108
§ 31. Механічна робота і потужність .....	110
§ 32. Кінетична енергія .....	113
§ 33. Потенціальна енергія.....	115
§ 34. Потенціальна енергія пружно деформованого тіла ..	117
§ 35. Закон збереження механічної енергії .....	118
Головне в розділі 2 .....	120

### Розділ 3. Релятивістська механіка

§ 36. Основні положення спеціальної теорії відносності. Швидкість світла у вакуумі .....	124
§ 37. Відносність одночасності подій. ....	126
§ 38. Взаємозв'язок маси і енергії .....	129
Головне в розділі 3 .....	131

### Молекулярна фізика і термодинаміка

#### Розділ 4. Властивості газів, рідин, твердих тіл

§ 39. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.....	134
§ 40. Маса молекул. Кількість речовини .....	136
§ 41. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ....	137
§ 42. Закон Бойля–Маріотта .....	139
<i>Лабораторна робота № 4. Дослідження ізотермічного процесу.....</i>	141
§ 43. Закон Гей-Люссака .....	142
§ 44. Абсолютна шкала температур .....	144
§ 45. Рівняння стану ідеального газу. Закон Шарля .....	146
☛ § 46. Рівняння Менделєєва–Клапейрона .....	149
§ 47. Пароутворення і конденсація. Насичена і ненасичена пара .....	151
§ 48. Вологість повітря. Точка роси .....	153
<i>Лабораторна робота № 5. Вимірювання відносної вологості повітря.....</i>	155
§ 49. Поверхневий натяг рідин. Капілярні явища.....	157
§ 50. Будова і властивості твердих тіл.....	160
§ 51. Полімери .....	163
Головне в розділі 4 .....	166

**Розділ 5. Основи термодинаміки**

§ 52. Термодинамічні системи і макропараметри стану речовини.....	171
§ 53. Внутрішня енергія тіла .....	173
§ 54. Робота газу .....	175
§ 55. Перший закон термодинаміки.....	176
§ 56. Теплові двигуни .....	177
Головне в розділі 5 .....	180
Відповіді до вправ .....	182
Алфавітний покажчик .....	185

*Навчальне видання*

**КОРШАК Євгеній Васильович**  
**ЛЯШЕНКО Олександр Іванович**  
**САВЧЕНКО Віталій Федорович**

## **ФІЗИКА**

**10 клас**

**Підручник**  
**для загальноосвітніх**  
**навчальних закладів**

**Рівень стандарту**

*Рекомендовано Міністерством освіти*  
*і науки України*

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

**Редактори М. Зубченко, О. Мовчан**  
**Обкладинка і макет, виготовлення**  
**ілюстрацій В. Марущинця**  
**Художній редактор В. Марущинець**  
**Технічний редактор В. Олійник**  
**Коректор І. Іванюс**  
**Комп'ютерна верстка С. Лобунець, Ю. Лебедева**

**Формат 60×90/16.**  
**Умовн. друк. арк. 12. Обл.-вид. арк. 11,96.**  
**Наклад 91 629 прим.**  
**Вид. № 1052. Зам № 0-1008.**

**Видавництво «Генеа», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.**  
**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи**  
**до Державного реєстру видавців серія ДК № 25 від 31.03.2000 р.**

**Виготовлення фотоформ та друк на**  
**ВАТ «Харківська книжкова фабрика «Глобус»»,**  
**вул. Бигельса, 11, м. Харків, 61012.**  
**Свідоцтво серія ДК № 2891 від 04.07.2007 р.**  
**www.globus-book.com**