



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.

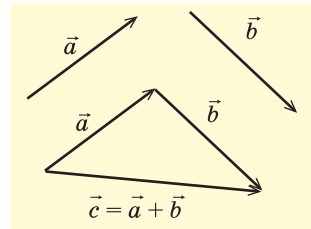
Фізичні величини, які є основою фізичного знання, за математичними властивостями бувають **скалярними** або **векторними**. Залежно від цього математичні дії з ними виконують за різними правилами. Зокрема, зі скалярними величинами (шлях, маса, робота, потужність тощо) діють як з дійсними числами. Наприклад,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

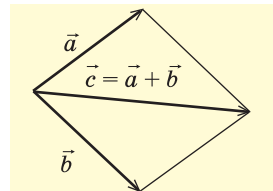
1. **Правило трикутника** (мал. 1): щоб додати два вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , треба від кінця вектора  $\vec{a}$  відкласти вектор  $\vec{b}$ ; тоді вектор  $\vec{c}$ , початок якого збігається з початком вектора  $\vec{a}$ , а кінець – з кінцем вектора  $\vec{b}$ , буде результуючим суми векторів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

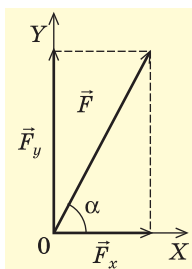


Мал. 1. Правило трикутника в доданні векторів

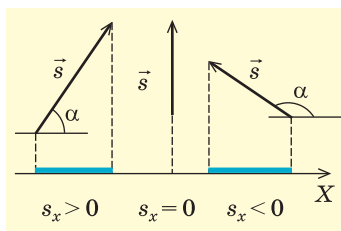


Мал. 2. Правило паралелограма в доданні векторів





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 (*kinematos*) 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, вимірявши 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**.

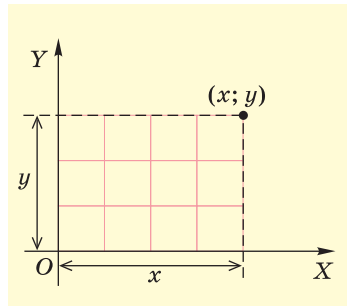
Як відомо, реальні фізичні тіла мають форму та об'єм, і тому задати їх положення в просторі не завжди можна однозначно, оскільки різні їх частини матимуть різні координати. Проте це завдання можна спростити, якщо не брати до уваги розміри тіла. Це можна робити лише за певних умов.

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.

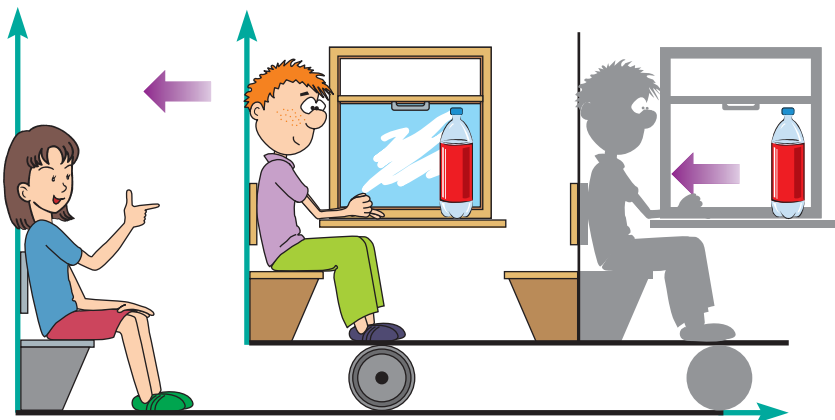
Розглянемо такий приклад. У вагоні на столі стоїть пляшка води (мал. 1.2). Під час руху потяга різні спостерігачі – пасажир у купе і проводжаючий, що перебуває на пероні, оцінять



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 проводячого вона рухається, тому що з часом змінює положення в системі координат, пов'язаній з пероном.



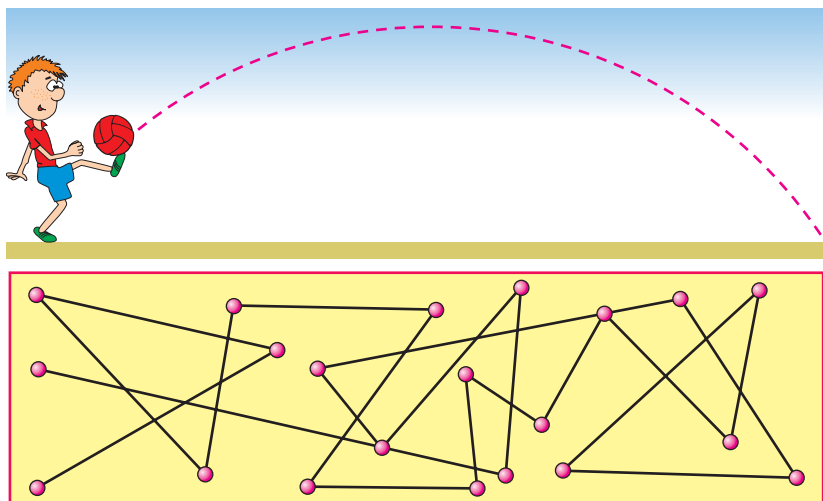
**Стан спокою і стан руху тіл відносні, оскільки залежать від обраної системи відліку.**

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 переконаємося 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).

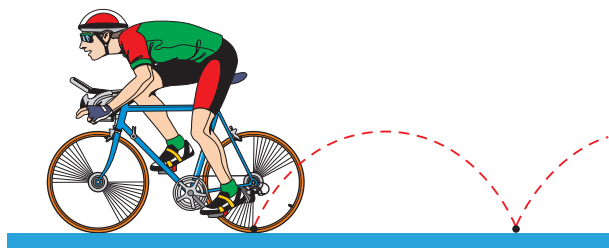
За формою траєкторії механічні рухи бувають **прямолінійними** і **криволінійними** (мал. 1.3). Траєкторія прямолінійного руху – пряма лінія. Наприклад, падіння кульки з певної висоти або рух візка по похилому жолобу. Під час криволінійного руху тіло переміщується за довільною кривою. Рух планет, політ 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.

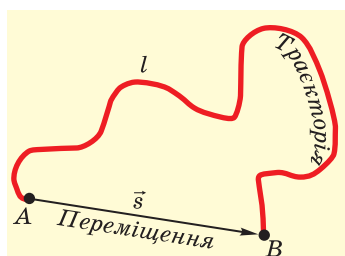
У Міжнародній системі одиниць (СІ) шлях вимірюють у метрах. На практиці використовують також інші одиниці шляху, кратні і частинні його похідні – кілометр (км), сантиметр (см), міліметр (мм) тощо.

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

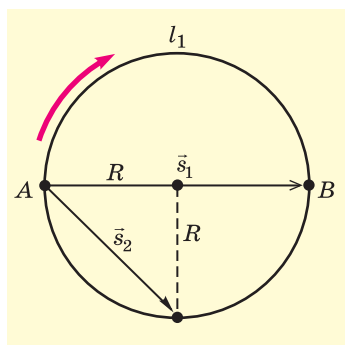
водій здійснив переміщення з точки  $A$  в точку  $B$ , яке можна оцінити, сполучивши початкове і кінцеве положення тіла в просторі прямою лінією і вказавши напрям руху.

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

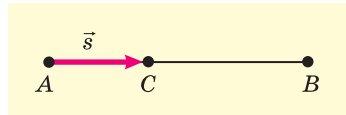
У момент, коли велосипедист пройде  $\frac{3}{4}$  кола, пройдений шлях дорівнюватиме  $l_2 = 2\pi R \cdot \frac{3}{4} = 471$  м; значення переміщення  $s_2 = R\sqrt{2} = 141$  м. У момент, коли велосипедист пройде повне коло, пройдений шлях дорівнюватиме  $l_3 = 2\pi R = 628$  м; модуль переміщення  $s_3 = 0$ . 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



Мал. 1.7. Шлях і переміщення автомобіля

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:  $l_{AC} \neq s_{AC}$ .

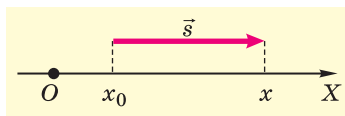
Таким чином, *пройдений шлях і переміщення за значенням однакові лише в тому разі, якщо тіло рухається вздовж прямої і не змінює напрямку руху.*

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.



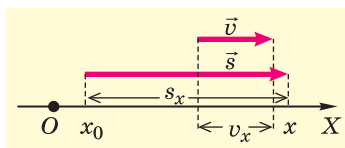
Мал. 1.8. Зміна координат тіла під час руху

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**:

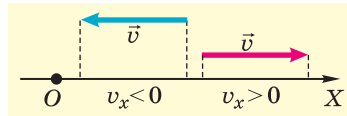
$$x - x_0 = v_x t, \text{ отже, } x = x_0 + v_x t. \quad (3)$$

**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

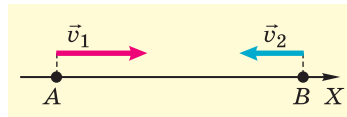
порівняйте результати. Оцініть, який з розв'язків найраціональніший.

**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.

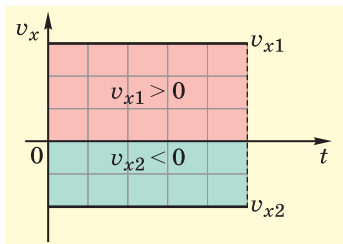
\* Зірочкою позначено задачі підвищеної складності.

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.

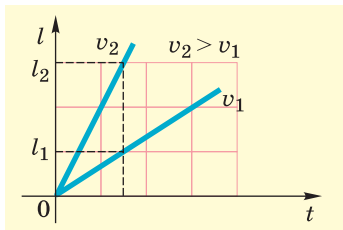
2. **Графік шляху  $l = l(t)$ .** З формули шляху  $l = vt$  випливає, що між пройденим шляхом і часом існує прямо пропорційна залежність. Графічно вона зображається прямою, що проходить через початок координат (адже шлях не може набувати від’ємних значень). Залежно від значення швидкості нахил прямих 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.

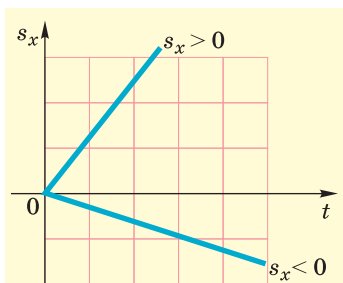
Якщо тіло змінює напрям руху – спочатку рухається в один бік, а потім повертається назад, то графік проекції переміщення матиме вигляд, зображений на малюнку 1.14 (у момент часу  $t_1$  тіло змінило напрям руху і почало рухатися у зворотний бік).



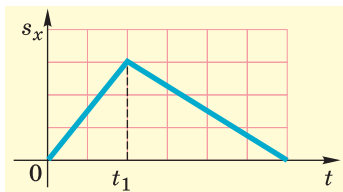
Мал. 1.11. Графік швидкості



Мал. 1.12. Графік шляху



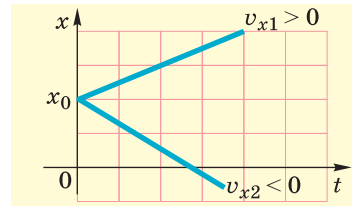
Мал. 1.13. Графік проекції переміщення



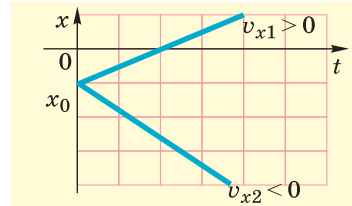
Мал. 1.14. Графік проекції переміщення, коли тіло змінює напрям руху



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:

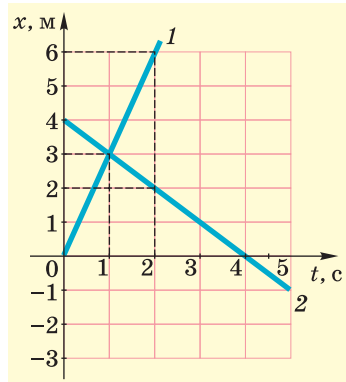
$$s_{x1} = 3t, s_{x1} = 12 \text{ м}, s_1 = 12 \text{ м};$$

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

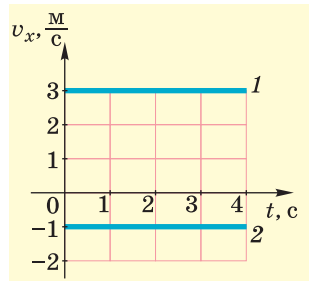
4) У момент зустрічі тіл їхні координати однакові, тобто це точка перетину графіків. Перпендикуляр, проведений до осі координат, укаже координату зустрічі, рівну 3 м. Для визначення часу зустрічі необхідно опустити перпендикуляр на вісь часу  $t$ ; тоді одержимо  $t = 1$  с.

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).

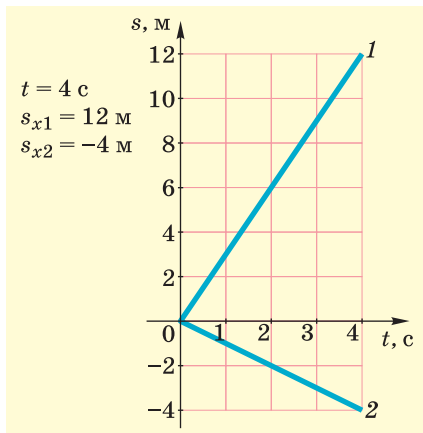
6) Використовуючи дані попередніх розв'язків задачі, побудуємо відповідні графіки (мал. 1.18–1.20).



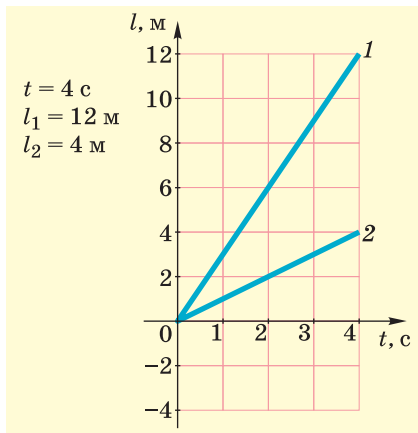
Мал. 1.17



Мал. 1.18



Мал. 1.19



Мал. 1.20

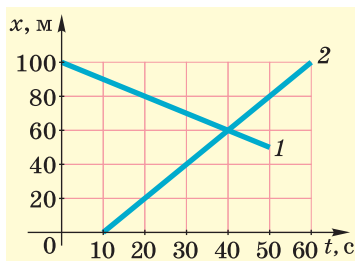
## Вправа 2

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  $160 \text{ м}$ , одночасно в одному напрямі починають рухатися два тіла зі швидкостями  $10 \text{ м/с}$  і  $6 \text{ м/с}$  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  $20 \text{ м}$ ? 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  $20 \text{ с}$  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  $36 \text{ км/год}$  у протилежному напрямі від обраного напрямку осі  $Ox$ . Його початкова координата дорівнювала  $20 \text{ м}$ . Знайти положення тіла через  $4 \text{ с}$  після початку руху, пройдений ним шлях і проекцію переміщення.

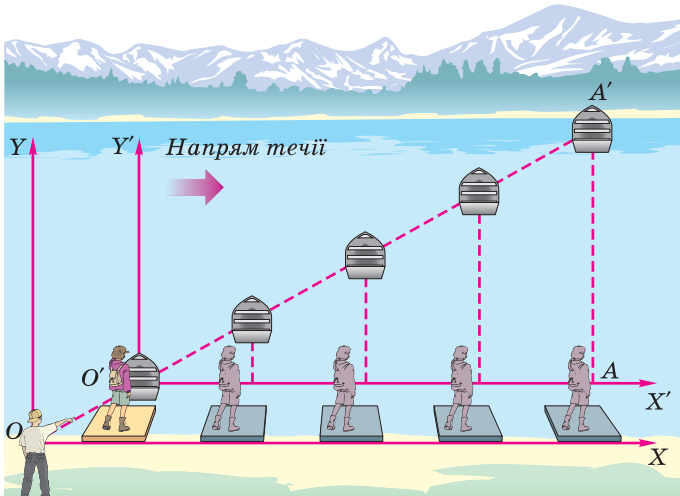
## § 7. Вігносність руху. Закон доганання швидкостей

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**.

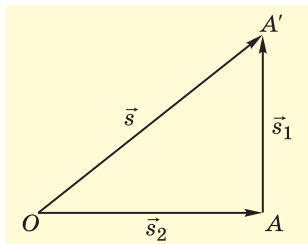
З іншими тілами, що рухаються в нерухомих системах відліку рівномірно і прямолінійно, пов'язують **рухомі системи відліку**. Слід пам'ятати, що вдалий вибір системи відліку багато спрощує розв'язування задачі.

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

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**.

32



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.

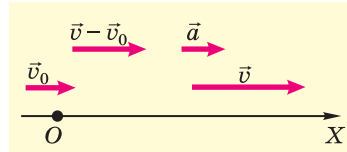
З формул (1) і (2) можна отримати кінематичне рівняння швидкості для рівноприскореного руху:

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

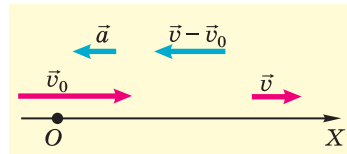
або в проекціях на обрану вісь  $OX$ :

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

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?