

Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев

# ФІЗИКА

П І Д Р У Ч Н И К

# 10

клас

**Рівень стандарту**

*Рекомендовано  
Міністерством освіти і науки України*

Харків  
«Гімназія»  
2010

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я721  
Г34

**Видано за рахунок державних коштів  
Продаж заборонено**

*Рекомендовано  
Міністерством освіти і науки України  
(наказ від 08.06.2010 № 544)*

**Наукову експертизу проводив**  
*Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова  
Національної академії наук України*

**Психолого-педагогічну експертизу проводив**  
*Інститут педагогіки  
Національної академії педагогічних наук України*

*Експерти, які здійснювали експертизу:*

- В. В. Кумайгородський*, Чупирянське НВО «Загальноосвітня школа І–ІІ ст. — дитячий садок» Білоцерківського району Київської обл., вчитель, вчитель-методист
- І. В. Грийцаровська*, Зборівська ЗОШ І–ІІІ ст. № 1 Тернопільської обл., вчитель, старший вчитель
- Г. В. Мачушинець*, Районний методичний кабінет відділу освіти Ківерцівської райдержадміністрації Волинської обл., методист
- Л. І. Ятвєцька*, Одеський обласний інститут удосконалення вчителів, науково-методична лабораторія, завідувач лабораторії

**Генденштейн Л. Е.**

Г34 **Фізика. 10 кл. : підруч. для загальноосвіт. навч. закладів : рівень стандарту / Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев. — Х. : Гімназія, 2010. — 272 с. : іл.**

ISBN 978-966-474-098-9.

**УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я721**

ISBN 978-966-474-098-9

© Л. Е. Генденштейн, І. Ю. Ненашев, 2010  
© ТОВ ТО «Гімназія», оригінал-макет,  
художнє оформлення, 2010

## ДО ВЧИТЕЛЯ ТА УЧНЯ

---

- Підручник призначено для вивчення фізики в 10-му класі за рівнем *стандарту* (2 уроки на тиждень).
- Автори прагнули подати фізику як живу науку, що є частиною загальної культури: наведено багато *прикладів* прояву та застосування фізичних законів у навколишньому житті, відомостей з історії фізичних *відкриттів*, подано ілюстрований опис фізичних *дослідів*.
- *Чітка структура підручника* полегшує розуміння навчального матеріалу. У тексті виділено головне, а в кінці параграфів і розділів зібрано висновки для узагальнення, повторення та конспекту.
- Виклад ведеться у формі *діалогу*: багато розділів починаються із *запитань*, відповідями на які є зміст цих розділів.
- Один параграф підручника розраховано приблизно *на один навчальний тиждень*.

## ВСТУП

---

1. Зародження та розвиток фізики як науки
2. Роль фізичного знання в житті людини й розвитку суспільства
3. Методи наукового пізнання
4. Фізика і техніка в Україні

### 1. ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТОК ФІЗИКИ ЯК НАУКИ

Слово «фізика» походить від давньогрецького слова «природа». Так назвав першу відому нам наукову працю про природні явища давньогрецький учений Арістотель, який жив у 4-му столітті до нашої ери.

Книга Арістотеля служила основним «підручником фізики» протягом майже двох тисячоліть. Наступний важливий крок у розвитку фізики зробив великий італійський учений Галілео Галілей (1564–1642). Його вважають основоположником фізики в її сучасному розумінні — як *дослідної* (експериментальної) науки. Галілей спростував на дослідах деякі важливі положення вчення Арістотеля.

Фізика досліджує механічні, теплові, електромагнітні, світлові явища, а також будову речовини. Завданням фізики, як і інших наук, є пошук *законів*, за допомогою яких можна пояснювати та передбачати широке коло явищ.

### 2. РОЛЬ ФІЗИЧНОГО ЗНАННЯ В ЖИТТІ ЛЮДИНИ Й РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА

Навчившись передбачати фізичні явища і керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, що розширили можливості науки, техніки та мистецтва, об'єднала всіх людей Землі надійними системами зв'язку.

Чудеса сучасної техніки з'явилися насамперед завдяки фізиці: без знання фізичних законів неможливо проектувати й використовувати машини, механізми, прилади, космічні апарати тощо.

Однак справа не тільки в «практичній» цінності фізики: знання фізики необхідне кожному з нас, щоб задовольнити природну цікавість у розумінні навколишнього світу.

Фізичні знання та методи народжують нові науки, наприклад біофізику, геофізику, астрофізику.

### 3. МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ

#### СПОСТЕРЕЖЕННЯ, НАУКОВА ГІПОТЕЗА Й ЕКСПЕРИМЕНТ

Явища світу, що нас оточує, надзвичайно складні, адже кожне з них залежить від дуже багатьох причин. Але, уважно спостерігаючи те чи інше явище, ми зауважуємо, що якісь причини більш істотні для його протікання, а якісь — менш істотні.

Зі *спостережень* виникають припущення, що для цілого кола явищ існують певні закономірності. Такі припущення називають науковими *гіпотезами*.

Щоб перевірити гіпотезу, учені проводять *досліди* (експерименти) з метою з'ясувати, як змінюється перебіг явищ у разі зміни умов їх перебігу. Для цього створюються *спеціальні умови*. Наприклад, в експериментах з вивчення руху Галілей намагався зменшити роль тертя.

Так від *спостережень* учені переходять до *експериментів*, тобто починають «ставити запитання природі».

#### НАУКОВІ МОДЕЛІ ТА НАУКОВА ІДЕАЛІЗАЦІЯ

Для формулювання гіпотези, постановки експерименту та пояснення його результатів необхідно побудувати *модель* певного об'єкту, явища або процесу — спрощене, схематизоване уявлення, у якому виділено найбільш важливі риси. Прикладами таких моделей є *матеріальна точка* — тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, або *ідеальний газ* — такий газ, розміри молекул якого нехтувано малі, причому взаємодія між молекулами відбувається тільки під час їх зіткнень.

Повністю усунути в експерименті «перешкоди», як правило, не вдається. Але за результатами експерименту іноді можна здогадатися про те, що мало б спостерігатися в «ідеальній» ситуації, тобто в разі, коли всі перешкоди було б усунуто цілком. Цю ідеальну ситуацію називають *науковою ідеалізацією*. Саме вона дозволяє побачити простоту законів, що криються за зовнішньою складністю явищ.

З прикладами наукової ідеалізації ми будемо неодноразово зустрічатися в нашому курсі.

З поняттям наукової ідеалізації пов'язане поняття *уявного експерименту*, тобто експерименту, проведеного за допомогою уяви. При цьому особливе значення має логічна несуперечність результатів уявного експерименту.

Важливим прикладом наукової ідеалізації є так зване «вільне тіло», тобто тіло, на яке не діють інші тіла. *Цілком* вільних тіл зазвичай не існує: навіть галактики, що віддалені одна від одної на величезну відстань, взаємодіють між собою. Однак, поставивши уявний експеримент, тобто подумки продовживши закономірність, виявлену на дослідах з реальними тілами, можна *уявити* тіло, що зовсім не взаємодіє з будь-якими іншими тілами. Роздуми про те, як рухатимуться такі тіла, привели Галілея до відкриття закону інерції.

## НАУКОВИЙ ЗАКОН І НАУКОВА ТЕОРІЯ

Коли гіпотеза про перебіг фізичних явищ підтверджується експериментом, вона стає *фізичним законом*.

Основний зміст механіки становлять три закони, сформульовані видатним англійським ученим Ісааком Ньютоном (знамениті «три закони Ньютона»), закон всесвітнього тяжіння (відкритий теж Ньютоном), а також закономірності для сил пружності та сил тертя. Для газових процесів відкрито закони, що описують залежність між тиском, об'ємом і температурою газу. Взаємодія електрично заряджених частинок, що перебувають у спокої, підпорядковується закону, відкритому французьким фізиком Шарлем Кулоном.

Сукупність законів, що описують широке коло явищ, називається *науковою теорією*. Наприклад, закони Ньютона становлять зміст класичної механіки.

Поряд із законами наукова теорія містить *означення* фізичних величин і понять, за допомогою яких формулюються закони цієї теорії. Дуже важливо, щоб усі обумовлені у фізичній теорії величини могли бути *виміряні на досліді*, оскільки справедливість фізичних законів і теорій може бути перевірено тільки дослідним шляхом.

## ПРИНЦИП ВІДПОВІДНОСТІ

Поява нової фізичної теорії не скасовує «стару» теорію, а *уточнює та доповнює* її. Однією з найважливіших вимог під час створення нових фізичних теорій є *принцип відповідності*, згідно з яким передбачення нової теорії повинні збігатися з передбаченнями «старої» теорії в межах її застосовності. Це означає, що нова теорія має включати «стару» теорію як окремий, граничний випадок. Принцип відповідності сформулював на початку 20-го століття данський фізик Нільс Бор — один із творців квантової механіки.

Так, передбачення спеціальної теорії відносності стосуються головним чином руху тіл зі швидкостями, порівняними зі швидкістю світла, але вони збігаються з передбаченнями класичної механіки, якщо швидкості руху тіл набагато менші від швидкості світла. Квантову механіку було розроблено для опису рухів частинок з надзвичайно малою масою (наприклад, електронів), але вона «перетворюється» на класичну, якщо маси тіл досить великі.

#### **СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ**

Сучасна фізична картина світу заснована на уявленні про те, що *речовина складається з дрібних частинок, між якими існує кілька видів фундаментальних взаємодій*. Це — сильні взаємодії, електромагнітні, слабкі та гравітаційні. У другій половині 20-го століття електромагнітні взаємодії було об'єднано зі слабкими в «електрослабку» взаємодію. Сьогодні продовжуються інтенсивні спроби побудови «великого об'єднання» — теорії, що дозволила б об'єднати усі відомі види взаємодій.

#### **4. ФІЗИКА І ТЕХНІКА В УКРАЇНІ**

Уся історія людства — це драматична історія пізнання людиною невідомого в довколишньому середовищі та спроби поставити собі на службу це невідоме. Завдяки цим спробам виникли природничі науки: астрономія, біологія, географія, хімія. Фізика з цілковитою підставою посідає серед них головне місце. Адже саме фізика впродовж століть визначала науково-технічний прогрес людства. Транспорт, енергетика, польоти в космос, сучасна електроніка — наше сучасне життя неможливе без використання досягнень фізичної науки. У майбутньому фізика напевно відіграватиме більш важливу та значну роль у розвитку людства. І судити про країну будуть по тому, якого рівня розвитку досягнула фізика в цій країні.

Наша країна може гордитися рівнем наукових досліджень, які проводяться у численних науково-дослідних центрах, рівнем технічного втілення наукових відкриттів.

Ядерна фізика і фізика плазми, фізика твердого тіла і фізика напівпровідників, сучасна електроенергетика, створення перших електронно-обчислювальних машин, авіа- і гелікоптеробудування, ракетна техніка і виробництво автомобілів, суднобудування і виробництво залізничного транспорту, сучасна техніка радіолокації — ось неповний перелік тих галузей фізики і техніки, у яких Україна є розвиненою державою.

## ЯДЕРНА ФІЗИКА

В історії людства не було наукової події, видатнішої за наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану та опанування ядерною енергією. Людина отримала у своє розпорядження могутнє джерело енергії, зосереджене в ядрах атомів.

Дослідження в галузі атомної фізики в Україні розпочалися в 1928 році, коли в Харкові, за ініціативою відомого вченого А. І. Іоффе, було створено Український фізико-технічний інститут (УФТІ). Через кілька років після заснування інституту, у 1932 році, молоді співробітники Антон Вальтер, Георгій Латишев, Олександр Лейпунський і Кирило Синельников уперше в Європі розщепили ядро атома — це було ядро літію (рис. В-1). У 30-х роках під керівництвом Льва Ландау в інституті починаються теоретичні дослідження атомного ядра та ядерних процесів. Квантова механіка, фізика твердого тіла, магнетизм, фізика низьких температур, фізика космічних променів, гідродинаміка, квантова теорія поля, фізика атомного ядра і фізика елементарних частинок, фізика плазми — у всіх цих галузях фізики Ландау вдалося зробити відкриття. Про нього говорили, що у «величезній будівлі фізики 20-го століття для нього не було замкнених дверей».



Рис. В-1



Ландау був нагороджений Нобелівською премією з фізики, обраний членом Лондонського королівського товариства та академії наук Данії, Нідерландів, США, Франції, Лондонського фізичного товариства. Немає у світі жодного фізика-теоретика, який не знає знаменитого «Курсу теоретичної фізики», основним автором якого був Ландау.

Дослідження взаємодії нейтронів з ядрами урану, проведені в 1939–1941 роках, свідчили про принципову можливість здійснення ланцюгової ядерної реакції і вивільнення внутрішньоядерної енергії. У 1940 році Фрідріх Ланге, Володимир Шпінель і Віктор Маслов подали заявку на винахід атомної бомби і здобуття в промислових масштабах урану.

Учені України внесли істотний вклад до пошуку методів отримання й використання атомної енергії в мирних цілях. Із середини 20-го століття дослідження атомного ядра проводяться в Інституті фізики і Інституті ядерних досліджень України (Київ). Результати цих досліджень — ядерні реактори і системи управління ядерними процесами, а також атомна промисловість.

На сьогодні в Україні більше ніж половина електроенергії виробляється на чотирьох атомних електростанціях: Запорізькій, Рівненській, Хмельницькій і Південно-Українській АЕС.

Запорізька АЕС — найпотужніша атомна електростанція в Європі і третя за потужністю у світі.

### **ФІЗИКА ПЛАЗМИ**

Плазма — це газоподібний стан речовини, за якого значна частина атомів йонізовані, тобто розпалися на позитивно заряджені йони та електрони. Дослідження плазми почалися ще в 19 столітті, коли розвиток вакуумної техніки дав змогу фізикам виготовити перші газорозрядні трубки. Дослідження газового розряду — а це один з видів плазми — привели до відкриття рентгенівських променів і електрона, створення нових джерел світла та апаратів з плазмової обробки поверхонь.

У земних умовах плазму можна зустріти хіба що в газорозрядних трубках і плазмових телевизорах, а у Всесвіті практично вся речовина знаходиться в стані плазми. Опанування плазми дозволить людині отримати нові джерела енергії, двигуни для космічних апаратів.

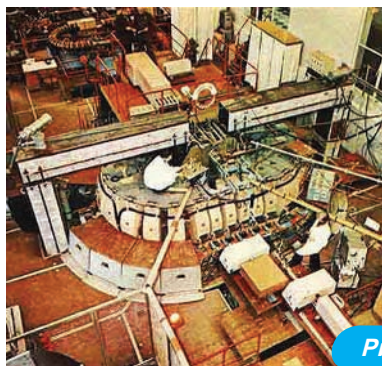


Рис. В-2

В Україні є декілька наукових центрів, у яких ведуться роботи з дослідження плазми. Передусім це Інститут фізики плазми (м. Харків) та Інститут фізики (м. Київ).

Плазма викликає інтерес у вчених здебільшого тому, що саме з нею пов'язано майбутнє енергетики Землі — термоядерний синтез. Саме термоядерний синтез є джерелом енергії зір. Щоб на Землі запалити зорю, потрібно нагрівати до десятків мільйонів градусів водневу плазму. Зробити це можна лише в спеціальних установках за допомогою магнітних і електричних полів. В Інституті фізики плазми працює установка «Ураган», у якій удалося створити рукотворне Сонце (рис. В-2). І хоча від цієї установки ще далеко до створення промислового термоядерного реактора, результати, отримані на установці «Ураган», поза сумнівом, будуть покладені в основу конструкції майбутніх термоядерних реакторів.

### **ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА І ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ**

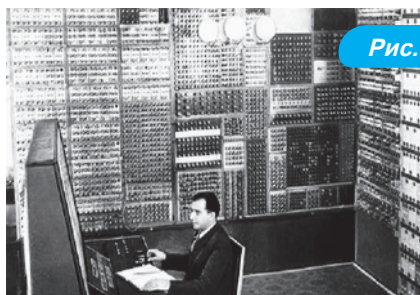
Сучасну фізику недаремно називають фізикою твердого тіла. Успіхи математичної та експериментальної фізики кінця 19-го і початку 20-го століть створили умови для бурхливого розвитку всіх напрямів фізики твердого тіла: фізики кристалів, теорії металів, фізики напівпровідників.

В Україні дослідження в галузі фізики твердого тіла і фізики напівпровідників почали проводитися в другій половині 20-го століття. У Києві було засновано Інститут фізики напівпровідників, який сьогодні є провідним науковим центром. В Інституті проводяться дослідження напівпровідникових структур, створюються нові матеріали та прилади мікроелектроніки.

У Харківському університеті на кафедрі теоретичної фізики і в теоретичному відділенні Харківського фізико-технічного інституту Ілля Ліфшиц розробив електронну теорію металів — теоретичні основи сучасної електроніки. Крім того, І. М. Ліфшиц є одним із творців сучасної динамічної теорії твердого тіла і фізики квантових кристалів.

### **ПЕРШІ КОМП'ЮТЕРИ**

У Києві в одній з лабораторій Інституту електротехніки наприкінці 40-х років було створено першу в СРСР і континентальній Європі електронно-обчислювальну машину, прообраз сучасних комп'ютерів (рис. В-3). Потрібно було вирішувати досить багато завдань, які вимагали швидких і складних обчислень. У першу чергу це управління польотами балістичних і космічних ракет. Надалі лабораторію було перетворено на Інститут кібернетики, який створив ряд комп'ютерних систем. Найбільше досягнення Інституту — створення сучасних суперкомп'ютерів для вирішення задач ядерної фізики, управління складними системами, проведення космічних досліджень.



*Рис. В-3*

### **ГЕЛІКОПТЕРО- І АВІАБУДУВАННЯ**

Україна має право пишатися Ігорем Сікорським і Олегом Антоновим. Ігор Сікорський всесвітньо відомий як творець першого серійного гелікоптера, а з Олегом Антоновим пов'язане створення в Україні сучасної авіаційної промисловості, повного циклу виробництва літаків, яким можуть похвалитися не більш як десять країн світу. У Сполучених Штатах Америки, куди Сікорський емігрував у 1919 році, він створив свої найкращі гелікоптери. І сьогодні у всьому світі знають гелікоптери Сікорського. Їх використовують як у цивільних, так і у військових цілях не лише у Сполучених Штатах Америки, але й у багатьох країнах світу.



Олег Антонов набув світової популярності, обіймаючи посаду директора Київського конструкторського бюро літакобудування. Він створив всесвітньо відомі літаки Ан-2, Ан-10, Ан-12, Ан-22 «Антей», Ан-24. Останнє творіння нашого знаменитого земляка — найбільший транспортний літак Ан-124 «Руслан», що випускають серійно.

У 1984 році ім'ям Олега Антонова було названо Київський авіаційний науково-технічний комплекс (АНТК) зі створення та виробництва літаків — АНТК ім. Антонова. Найкращим пам'ятником великому конструктору стало створення надважкого транспортного літака Ан-225 «Мрія» (рис. В-4), призначеного для перевезення радянського космічного корабля «Буран». АНТК ім. Антонова розробив і випустив понад 100 типів літаків цивільного і військового призначення. І сьогодні Авіаційний науково-технічний комплекс ім. Антонова належить до найвідоміших авіабудівних фірм світу.

### **КОРАБЛЕБУДУВАННЯ**

Наприкінці 18-го століття в Україні було побудовано великі кораблебудівні заводи, поблизу яких виникли міста Миколаїв і Херсон. Спочатку на цих заводах будували дерев'яні парусні військові кораблі та цивільні судна. З розвитком техніки заводи розширювалися: дерев'яні парусні судна замінилися на пароплави, які мали сталеві корпуси.

У 19–20-му століттях кораблебудування України бурхливо розвивалося — наша країна перетворилася на одну з найбільших кораблебудівних держав Європи. Під кінець

20-го століття на 11 машинобудівних і приладобудівних заводах Миколаєва, Херсона, Керчі, Севастополя, Києва, Одеси було зосереджено близько 10 % усього обсягу світового кораблебудування. Гордістю українського суднобудування були і залишаються ракетні й авіаносні крейсери, великі протичовнові кораблі та транспортні судна, криголами. Серед кораблебудівних заводів України — найбільший у Європі Чорноморський суднобудівельний завод неподалік від Миколаєва (рис. В-5). Ми впевнені, що вам, сьогоднішнім старшокласникам, удасться вписати нові сторінки в славний літопис українських кораблебудівників.

### **РАКЕТОБУДУВАННЯ**

Уперше бойові ракети в Європі застосували в 1515 році запоріжці під командуванням гетьмана Богдана Ружинського: вони атакували начиненими порохом ракетами татарську кінноту кримського хана Мелік-Гірея, унаслідок чого він зазнав нищівної поразки, хоча мав кількісну перевагу над запоріжцями. Але незабаром козаки втратили секрет «ракетної зброї», бо всі ракетники, що брали участь у військовій кампанії, загинули в подальших битвах.



*Рис. В-5*

«Якби у нас ракетна зброя була раніше, то хтозна, чи посмів би Бонапарт ступити на нашу землю. А якби й почав свою варварську навалу, то, можливо, його б швидше зупинили. І тоді сиділи б разом з нами багато хоробрих, котрі загинули в боях». Ці слова належать нашому землякові та знаменитому військовому винахідникові Олександрові Засядько. Він вів свій родовід від тих самих запоріжців-ракетників.

Народився Олександр Засядько в 1779 році в селищі Лютенці Гадяцького району Полтавської області. Здобувши військову освіту, він брав участь у війнах з турками і французами. Вийшовши у відставку, Олександр Засядько починає винаходити бойові порохові ракети. Він сконструював пускові станки, які давали змогу вести залповий вогонь шістьма ракетами. Це був прообраз знаменитої «катюші», одним із винахідників якої був теж наш земляк, полтавчанин Юрій Победоносцев.

Ракетна зброя Олександра Засядько відіграла вирішальну роль під час облоги потужної турецької фортеці Браїлов (у Вінницькій області) весною 1828 року. Перед вирішальним штурмом по фортеці було зроблено залп бойовими фугасними ракетами. Вони зі страшним свистом летіли до фортеці й там вибухали. Стало видно як удень. Після короткої перерви ракетний залп повторили, але вже запальними снарядами. Фортеця впала.

Серед тих, хто зміг передбачити освоєння космосу ракетними літальними апаратами і створити перші космічні апарати, є імена винахідників і вчених, які теж тісно пов'язані з Україною: Микола Кибальчич, Юрій Кондратюк (Олександр Шаргей), Сергій Корольов, Михайло Янгель, Валентин Глушко та інші.

Сьогодні славу Олександра Засядько поширюють і визнають світовий рівень у ракетно-космічній науці й техніці Дніпропетровський ракетно-космічний комплекс, до складу якого входить КБ «Південне» і завод «Південмаш». Тут конструюють і виробляють ракети, які виводять на навколоземну орбіту супутники зв'язку і дослідні лабораторії, тому Україна є космічною державою. З єдиного у світі морського космодрому «Sea Launch» стартують лише українські ракети «Зеніт» (рис. В-6). У своєму класі це найнадійніші та досконаліші космічні ракети у світі.





Наша розповідь про науку й техніку в Україні, звичайно ж, є неповною. Можна було б згадати одного з творців теорії броунівського руху, львів'янина Мар'яна Смолуховського, дослідника електричних і магнітних явищ, одесита Миколу Умова, винахідника методу просвітлення оптики, тернопільця Олександра Смакулу, дослідника рентгенівського випромінювання, а також тернопільця Івана Пулюя. Згадаймо також про перший суцільнозварний міст через Дніпро в Києві та його розробника Євгена Патона, про кращий танк Другої світової війни Т-34 і його творців, конструкторів та інженерів Харківського паровозобудівного заводу Михайла Кошкіна та Олександра Морозова.

# 1 КІНЕМАТИКА

---

- § 1. Механічний рух
- § 2. Прямолінійний рівномірний рух
- § 3. Прямолінійний рівноприскорений рух
- § 4. Приклади розв'язування задач
- § 5. Рівномірний рух по колу



## § 1. МЕХАНІЧНИЙ РУХ

---

1. Основне завдання механіки
2. Фізичне тіло та матеріальна точка
3. Система відліку. Відносність руху
4. Траєкторія, шлях і переміщення
5. Векторні величини у фізиці

### 1. ОСНОВНЕ ЗАВДАННЯ МЕХАНІКИ

Механіка вивчає механічний рух та взаємодію тіл.

*Механічним рухом* називають зміну з часом положення тіла відносно інших тіл.

Часто для стислості ми називатимемо механічний рух просто «рухом».

Приклади механічного руху: рух зір і планет, потягів, літаків, автомобілів та космічних кораблів.

*Основне завдання механіки* полягає в тому, щоб визначити положення тіла в будь-який момент часу відносно інших тіл.

Для розв'язання основного завдання механіки треба знати *початкове положення тіла та його швидкість у початковий момент часу*. Крім того, якщо швидкість тіла змінюється з часом, треба знати, як саме вона змінюється.

Як ми побачимо далі, швидкість тіла змінюється внаслідок дії на це тіло інших тіл. Закони, що визначають, як змінюються швидкості тіл, і є основними законами механіки. Але щоб сформулювати закони механіки й навчитися їх застосовувати, треба спочатку навчитися описувати положення тіла та його рух.

Опис руху тіл становить зміст першого розділу механіки, який називають *кінематикою*.

### 2. ФІЗИЧНЕ ТІЛО ТА МАТЕРІАЛЬНА ТОЧКА

Як ви вже знаєте, у фізиці тілом (точніше, фізичним тілом) називають будь-який предмет: це може бути, наприклад, планета, автомобіль чи навіть піщинка.

У багатьох задачах для опису руху тіла достатньо задати рух тільки *однієї* його точки. У такому разі тіло подумки замінюють однією точкою.

Тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають *матеріальною точкою*.

Матеріальна точка є найпростішою моделлю тіла, використання якої значно спрощує опис його руху.

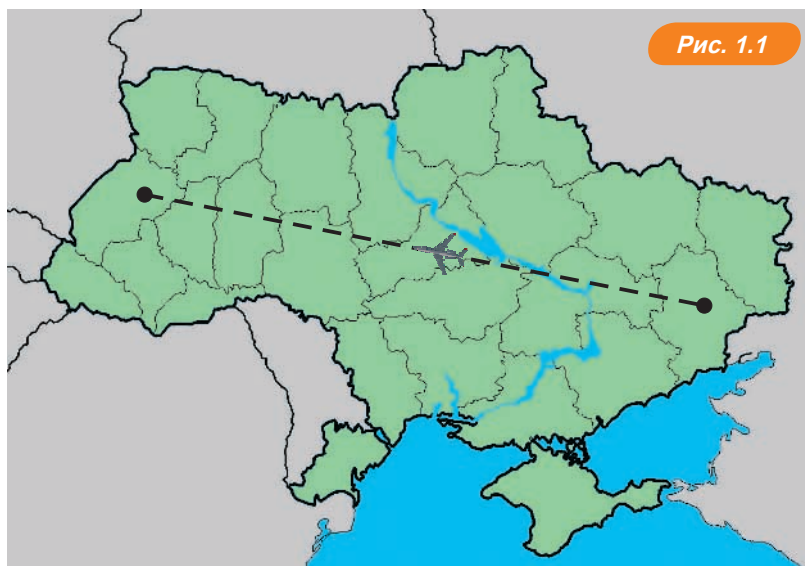
Далі ми розглядатимемо в основному задачі, у яких тіло можна вважати матеріальною точкою.

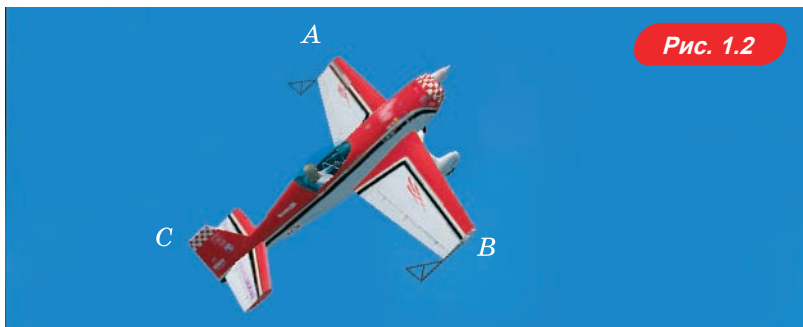
### КОЛИ ТІЛО МОЖНА ВВАЖАТИ МАТЕРІАЛЬНОЮ ТОЧКОЮ?

Чи можна вважати тіло матеріальною точкою, залежить не від розмірів тіла («велике» воно чи «маленьке»), а від поставленої задачі. Тому те саме тіло в одних задачах може розглядатися як матеріальна точка, а в інших — ні.

Так, тіло можна вважати матеріальною точкою, якщо *розміри тіла малі порівняно з відстанню, пройденою тілом*, оскільки в цьому випадку розбіжність у русі різних точок тіла є несуттєвою. Розглянемо приклади.

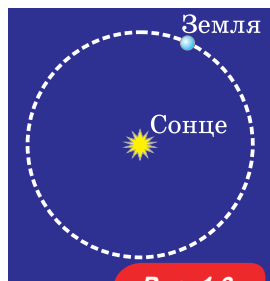
**Рух літака.** Якщо треба знайти час перельоту літака між двома містами, літак можна вважати матеріальною точкою, оскільки розміри літака набагато менші, ніж відстань між містами (рис. 1.1).





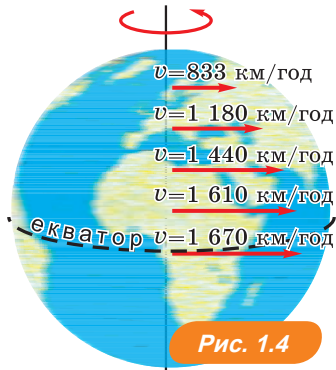
Якщо ж потрібно описати рух літака під час виконання фігур вищого пілотажу, то слід урахувувати, що при цьому різні точки літака рухаються по-різному: літак може похитувати крилами, піднімати й опускати ніс. Для опису руху літака треба при цьому задавати положення *декількох* точок літака (наприклад, *A, B, C* на рис. 1.2), тобто в цьому випадку літак не можна вважати матеріальною точкою.

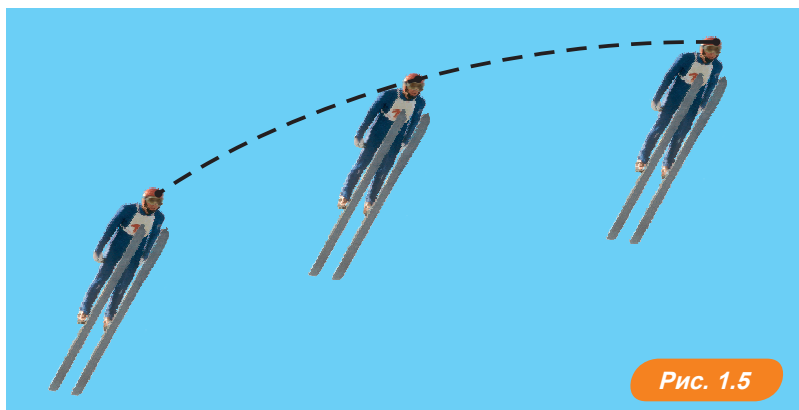
**Рух Землі.** Розглядаючи рух Землі навколо Сонця, Землю можна вважати матеріальною точкою, адже розміри Землі набагато менші, ніж відстань від Землі до Сонця (рис. 1.3). Розглядаючи силу, що діє на Землю з боку Сонця, Землю також часто можна вважати матеріальною точкою.



Якщо ж нас цікавить положення різних точок Землі в різні моменти під час її добового обертання, Землю не можна розглядати як матеріальну точку (рис. 1.4).

Тіло можна вважати матеріальною точкою також за умови *поступального руху* тіла, тобто під час такого руху, коли всі точки тіла рухаються однаково (при цьому будь-який відрізок, що з'єднує дві точки тіла, залишається паралельним самому собі), оскільки під час поступального





руху для опису руху тіла достатньо задати рух тільки однієї точки тіла. Розглянемо приклад.

**Політ лижника з трампліна.** Під час стрибка з трампліна лижник у польоті рухається практично поступально. Тому для опису руху лижника достатньо задати рух тільки однієї його точки (рис. 1.5). Отже, описуючи рух лижника, людину можна вважати матеріальною точкою.

### 3. СИСТЕМА ВІДЛІКУ. ВІДНОСНІСТЬ РУХУ

Коли описують рух тіла, то завжди — явно чи неявно — мають на увазі рух цього тіла *відносно якогось іншого тіла*.

Тіло, відносно якого розглядають рух усіх тіл у даній задачі, називають *тілом відліку*.

Часто за тіло відліку приймають Землю. Наприклад, коли говорять: «Автомобіль їде зі швидкістю 100 км/год», мають на увазі швидкість автомобіля відносно Землі. Але якщо говорять, що пасажир їде по вагону зі швидкістю 4 км/год, мають на увазі швидкість пасажирів відносно вагона, тобто тілом відліку є вагон.

Іноді без прямої вказівки на тіло відліку обійтися просто не можна: наприклад, фраза «ракета летить зі швидкістю 10 км/с» буде незрозумілою, якщо не зазначити, відносно якого тіла розглядається рух ракети — Землі, Сонця чи іншої ракети.

Положення тіла в даній момент часу задають за допомогою *системи координат*, пов'язаної з тілом відліку. А оскільки рух тіла характеризується зміною положення тіла з часом, для опису руху потрібен також *годинник*.

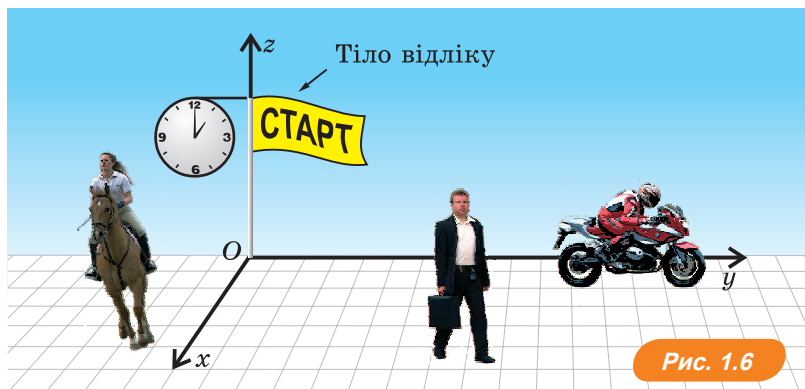


Рис. 1.6

Тіло відліку та пов'язані з ним система координат і годинник утворюють *систему відліку* (рис. 1.6).

#### 4. ТРАЕКТОРІЯ, ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ

Лінію в просторі, по якій рухається тіло, називають *траєкторією руху тіла*.

Траєкторія є уявною лінією, але якщо тіло залишає слід під час руху, то ця лінія стає видимою. Наочний приклад — слід, який залишає літак (рис. 1.7) або катер (рис. 1.8). Цей слід показує траєкторію літака в системі відліку, пов'язаній із Землею. У першому випадку траєкторія тіла *прямолінійна*, у другому — *криволінійна*.

Якщо тіло повернулося в початкову точку, траєкторію називають *замкнутою*.

Наприклад, якщо ви вранці ви-йшли з дому, а ввечері повернулися додому, траєкторія вашого руху за день є замкнутою.

Довжину траєкторії називають *шляхом*, пройденим тілом.

Шлях є скалярною величиною, зазвичай його позначають літерою  $l$ .

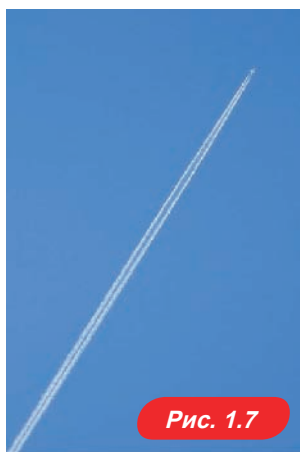


Рис. 1.7



Рис. 1.8



Рис. 1.9

Зверніть увагу: шляхом вважають суму довжин усіх ділянок траєкторії, у тому числі тих, що накладаються одна на одну. Наприклад, якщо автомобіль зробив три повні кола по кільцевому шосе, то пройдений ним шлях у три рази більший за довжину кола.

Щоб визначити, куди перемістилося тіло в даний момент із початкової точки, задають

*переміщення* тіла — напрямлений відрізок, проведений з початкового положення тіла в його положення в даний момент часу (рис. 1.9).

Переміщення є *векторною* величиною, зазвичай його позначають  $\vec{s}$ ; модуль переміщення позначають  $s$ . Далі ми розглянемо, як використовують векторні величини у фізиці.

### ЧИ ЗАЛЕЖИТЬ ТРАЄКТОРІЯ ВІД ВИБОРУ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ?

Так, залежить: наприклад, в одній системі відліку траєкторія руху тіла може бути прямолінійною, а в іншій — криволінійною. Тому від вибору системи відліку залежить і шлях, і переміщення тіла.

**Приклад (із книги Галілея).** Нехай з вершини щогли корабля, що пливе, на його палубу падає ядро. У системі відліку, пов'язаній із кораблем, траєкторія руху ядра — прямолінійний відрізок (рис. 1.10, а). З точки ж зору спостерігача, який стоїть на березі, ядро мало початкову горизонтальну швидкість, що дорівнювала швидкості корабля. Тому в системі відліку, пов'язаній із берегом, траєкторія руху одного й того самого ядра криволінійна (рис. 1.10, б). Легко побачити, що пройдений ядром шлях і переміщення ядра у двох розглянутих системах відліку також різні.

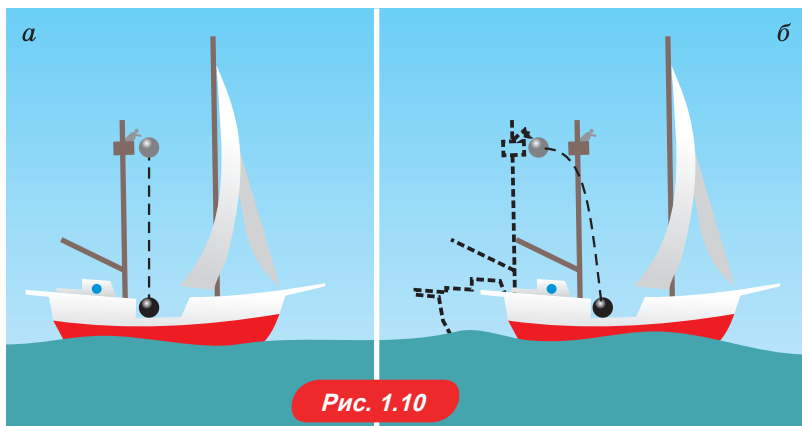


Рис. 1.10



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Закріпимо картонний або фанерний диск так, щоб він міг обертатися навколо горизонтальної осі (рис. 1.11).

Розкрутимо диск, піднесемо до нього рейку (не торкаючись диска) і проведемо уздовж рейки грудочкою крейди, щоб крейда залишила слід на диску. У системі відліку, пов'язаній із Землею, траєкторія грудочки крейди прямолінійна — крейда рухається вздовж рейки. Однак на диску крейда викреслює спіраль, що показує траєкторію руху тієї ж грудочки крейди в системі відліку, пов'язаній з диском.

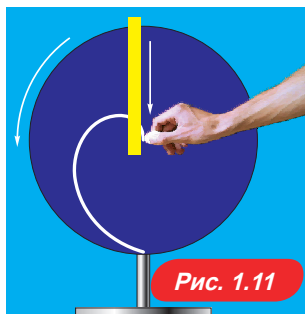


Рис. 1.11

## 5. ВЕКТОРНІ ВЕЛИЧИНИ У ФІЗИЦІ

У фізиці використовують багато векторних величин. Такими величинами є, наприклад, переміщення, швидкість, сила. Розглядаючи багато задач, треба вміти виконувати різні дії з векторними величинами. Розглянемо тут додавання векторних величин на прикладі додавання переміщень.

Нехай літак перелетів з міста  $M$  до міста  $H$ , а звідти — до міста  $K$ . На рисунку 1.12,  $a$  вектором  $\vec{s}_1$  позначено переміщення літака з  $M$  у  $H$ , а вектором  $\vec{s}_2$  — переміщення літака

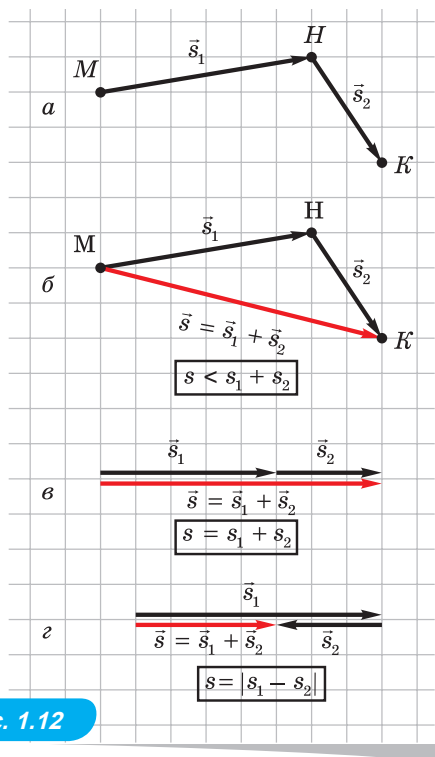


Рис. 1.12

з  $H$  у  $K$ . Результатом двох переміщень є переміщення  $\vec{s}$  — це вектор, що з'єднує  $M$  і  $K$ .

Ми виконали зараз додавання векторів за «правилом трикутника».

Щоб за цим правилом знайти суму двох векторів, треба початок другого вектора з'єднати з кінцем першого вектора (рис. 1.12, а). Тоді сумою цих двох векторів є вектор, початок якого збігається з початком першого вектора, а кінець — з кінцем другого вектора (рис. 1.12, б).

За допомогою «правила трикутника» можна додавати також вектори, напрямлені вздовж однієї прямої (рис. 1.12, в, г). Щоправда, у цьому випадку справжній трикутник не виходить, бо всі вектори лежать на одній прямій. Зверніть увагу: у цьому випадку рівність  $s = s_1 + s_2$  має місце тільки тоді, коли вектори-доданки напрямлені однаково (рис. 1.12, в). Якщо ж вектори-доданки напрямлені протилежно, то  $s = |s_1 - s_2|$  (рис. 1.12, г).



## ПРОЕКЦІЇ ВЕКТОРНОЇ ВЕЛИЧИНИ НА ОСІ КООРДИНАТ

При розв'язуванні задач зазвичай складають рівняння, що зв'язують фізичні величини, а потім розв'язують ці рівняння. Якщо величини векторні, доводиться «стежити» не тільки за модулем кожної такої величини, але й за її напрямом. Розв'язання задач значно спрощується завдяки тому, що *одну векторну величину можна задати за допомогою кількох скалярних величин у такий спосіб.*

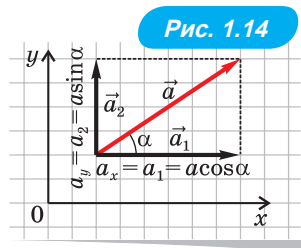
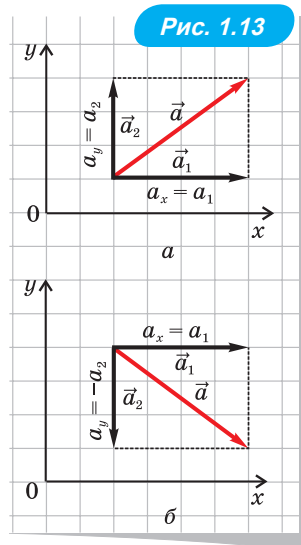
Будь-яку векторну величину можна представити у вигляді суми трьох векторних величин, напрямлених уздовж осей координат. Ці векторні величини називають її *складовими*. А кожну складову векторної величини можна охарактеризувати *числом*: модуль цього числа дорівнює модулю складової, а знак числа визначається напрямом складової. Якщо вона напрямлена в додатному напрямі осі координат, то це число додатне, а якщо у від'ємному — то від'ємне. Це число називають *проекцією векторної величини на відповідну координатну вісь*<sup>1</sup>.

Проекції векторної величини  $\vec{a}$  на осі координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  позначають  $a_x$ ,  $a_y$  і  $a_z$ . Вони мають ті самі одиниці, що й модуль величини  $\vec{a}$ . Наприклад, одиниці проекції переміщення — метри, а проекції швидкості — метри за секунду. На рис. 1.13 показано, як знаходити проекції векторної величини, заданої на площині. На рис. 1.13, а обидві проекції вектора  $\vec{a}$  додатні, а на рис. 1.13, б проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $x$  додатна, а на вісь  $y$  — від'ємна.

Ще раз звертаємо увагу на те, що *знак проекції може бути як позитивним, так і негативним.*

Виразимо проекції векторної величини  $\vec{a}$ , заданої на площині, через її модуль  $a$  і кут  $\alpha$  між напрямом  $\vec{a}$  і віссю  $x$ .

Як видно з рис. 1.14,  $a_x = a \cos \alpha$ ,  $a_y = a \sin \alpha$ . Оскільки складові век-



<sup>1</sup> Проекції вектора в курсі геометрії називають координатами вектора.

торної величини і сама векторна величина утворюють прямокутний трикутник, модуль векторної величини виражається через її проекції за допомогою формули  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ .

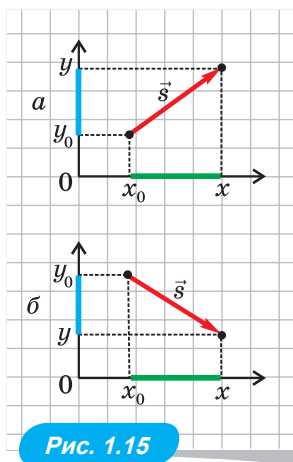
При додаванні векторних величин їхні проекції додаються.

### ЯК ПОВ'ЯЗАНІ ПРОЕКЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ ТІЛА З ЙОГО КООРДИНАТАМИ?

Для наочності обмежимося рухом на площині.

Нехай тіло з точки з координатами  $x_0, y_0$  перемістилося в точку з координатами  $x, y$  (рис. 1.15). Тоді переміщення  $\vec{s}$  — це вектор, проведений із точки з координатами  $x_0, y_0$  у точку з координатами  $x, y$ . Отже,  $s_x = x - x_0, s_y = y - y_0$ . Таким чином,  $x = x_0 + s_x, y = y_0 + s_y$ .

Зверніть увагу: у цих формулах стоїть знак «плюс» незалежно від того, у якому напрямі рухалося тіло — у додатному напрямі осі (рис. 1.15, а) чи у від'ємному (на рис. 1.15, б тіло рухається у від'ємному напрямі осі  $y$ ).



### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Механічним рухом називають зміну з часом положення тіла відносно інших тіл.
- Основне завдання механіки полягає в тому, щоб визначити положення тіла в будь-який момент часу. Для розв'язання основного завдання механіки треба знати початкове положення тіла, його швидкість у початковий момент часу й те, як швидкість змінюється з часом.
- Тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають матеріальною точкою. Тіло можна вважати матеріальною точкою, якщо розміри тіла малі порівняно з відстанню, пройденою тілом, а також у разі, коли тіло рухається поступально.
- Тіло, відносно якого розглядають рух усіх тіл у даній задачі, називають тілом відліку.
- Тіло відліку та пов'язані з ним система координат і годинник утворюють систему відліку.
- Лінію в просторі, по якій рухається тіло, називають траєкторією руху тіла.
- Довжину траєкторії називають шляхом, пройденим тілом.

- Переміщення тіла — напрямлений відрізок, проведений з початкового положення тіла в його положення в даний момент часу.
- Форма траєкторії, шлях та переміщення тіла залежать від вибору системи відліку.

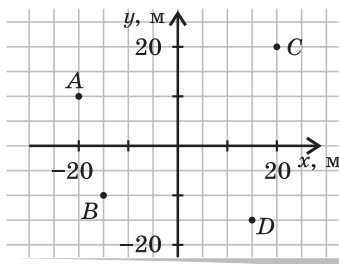
## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Наведіть приклади задач, коли ваше власне тіло можна вважати матеріальною точкою, а коли — ні.
2. Наведіть приклади задач, у яких спортсмена можна розглядати як матеріальну точку і в яких не можна.
3. Навіщо потрібна система відліку? З чого вона складається?
4. Що приймають за тіло відліку, коли говорять: а) автомобіль їде зі швидкістю 100 км/год; б) Земля рухається по своїй орбіті зі швидкістю 30 км/с?
5. Чи може траєкторія руху перетинати себе? Наведіть приклади, що підтверджують вашу відповідь.
6. Чим відрізняється шлях від переміщення? Чи може шлях під час руху тіла зменшуватися?

### Другий рівень

7. Як рухається тіло, якщо модуль переміщення дорівнює шляху, пройденому тілом?
8. Яка траєкторія руху тіла, якщо його переміщення дорівнює нулю, а шлях нулю не дорівнює?
9. Хлопчик їде на велосипеді по прямолінійній ділянці горизонтального шляху. Намалюйте в зошиті траєкторію руху сідла велосипеда відносно шляху; педалей велосипеда.
10. На рисунку показано послідовні положення  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  через рівні проміжки часу бджоли, яка літає лугом. Перенесіть рисунок у зошит і накресліть вектори переміщень бджоли за кожний з цих проміжків.



## § 2. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОМІРНИЙ РУХ

1. Швидкість прямолінійного рівномірного руху
2. Графіки прямолінійного рівномірного руху
3. Середня швидкість

### 1. ШВИДКІСТЬ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ

Найпростіший вид руху — прямолінійний рівномірний рух.

*Прямолінійним рівномірним рухом* називають рух, під час якого тіло за будь-які рівні проміжки часу здійснює однакові переміщення.

Прямолінійним рівномірним рухом є, наприклад, рух автомобіля по прямому шосе, коли спідометр «застигає» на одному показанні, скажімо «60 км/год».

Швидкість прямолінійного рівномірного руху дорівнює відношенню переміщення тіла до проміжку часу, за який відбулося це переміщення:

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

З цієї формули випливає, що

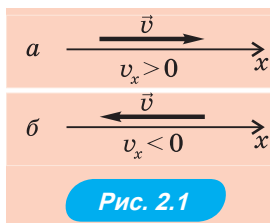
$$\vec{s} = \vec{v}t.$$

Зручно направити вісь  $x$  уздовж прямої, по якій рухається тіло, тоді  $v_x = \frac{s_x}{t}$ .

Проекція швидкості  $v_x$  може бути як *додатною* (рис. 2.1, а), так і *від'ємною* (рис. 2.1, б) — залежно від того, у якому напрямі осі  $x$  рухається тіло.

Формули залежності від часу проекції переміщення  $s_x$  і координати  $x$  мають вигляд:

$$s_x = v_x t, \quad x = x_0 + v_x t.$$



Одиниця швидкості в SI — 1 м/с. Це швидкість неспішної прогулянки. Ідучи з такою швидкістю, людина проходить за одну годину 3600 м, тобто її швидкість дорівнює 3,6 км/год. Швидкість автомобілів і потягів задають зазвичай у кілометрах за годину.

Швидкість ракет і штучних супутників Землі задають у кілометрах за секунду (км/с).

Як ми побачимо в § 10. Закон всесвітнього тяжіння, швидкість руху штучного супутника Землі навколоземною орбітою становить близько 8 км/с.

## 2. ГРАФІКИ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОМІРНОГО РУХУ

Наочне уявлення про рух тіла дають графіки залежності від часу швидкості, переміщення, координати і шляху. Розглянемо, як будують ці графіки, на конкретному прикладі.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

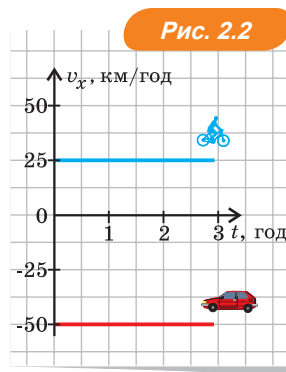
По прямій дорозі їдуть велосипедист і автомобіль. Велосипедист їде в одному напрямі зі швидкістю 25 км/год, автомобіль — у протилежному напрямі зі швидкістю 50 км/год. У початковий момент велосипедист перебував у точці з координатою  $x = 25$  км, автомобіль — у точці з координатою  $x = 100$  км. Побудуємо графіки залежності від часу проекції швидкості, переміщення, координати та шляху.

**Розв'язання.** Направимо вісь  $x$  у напрямі швидкості велосипедиста.

**Графіки залежності проекції швидкості від часу.** Оскільки тіла рухаються з постійною швидкістю, графік функції  $v_x(t)$  — пряма, паралельна осі  $t$ . Для велосипедиста  $v_x > 0$ , тому графік проходить вище осі  $t$ , а для автомобіля  $v_x < 0$ , тому графік проходить нижче осі  $t$ . Ці графіки наведено на рис. 2.2.

Графік залежності проекції швидкості від часу для прямолінійного рівномірного руху може здатися не надто цікавим. Однак він має важливу властивість, яка невдовзі нам допоможе. Для зручності розглянемо випадок, коли проекція швидкості є додатною. Тоді

площа фігури, обмеженої графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , чисельно дорівнює проекції переміщення.



Щоб переконатися в цьому, розглянемо фігуру, розташовану під графіком проєкції швидкості (її виділено кольором на рис. 2.3).

Ця фігура — прямокутник. Його площа дорівнює добутку висоти  $v_x$  на основу  $t$ , тобто дорівнює  $v_x t$ . А це чисельно дорівнює переміщенню за умови прямолінійного рівномірного руху.

**Графік залежності проєкції переміщення від часу.** З формули  $s_x(t) = v_x t$  випливає, що графіком  $s_x(t)$  є *пряма*, що проходить через початок координат (рис. 2.4). Якщо  $v_x > 0$ , то  $s_x$  збільшується з часом (саме так для велосипедиста), а якщо  $v_x < 0$ , то  $s_x$  зменшується з часом (саме так для автомобіля).

Зверніть увагу на те, що нахил *графіка*  $s_x(t)$  *тим більший, чим більший модуль швидкості*.

**Графік залежності координати від часу.** Графік  $x(t) = x_0 + s_x(t)$  відрізняється від графіка  $s_x(t)$  тільки зсувом на  $x_0$  по осі ординат (рис. 2.5). Точка перетину двох графіків відповідає моменту, коли координати тіл збігаються, отже, ця точка графіка визначає момент часу і координату зустрічі двох тіл.

По наведених графіках видно, що велосипедист і автомобіль протягом першої години рухалися назустріч один одному, а потім — віддалялися один від одного.

**Графік шляху.** Зверніть увагу: хоча велосипедист і автомобіль рухаються в протилежних напрямках, в обох випадках пройдений кожним з них шлях *зростає* з часом (рис. 2.6).

Рис. 2.3

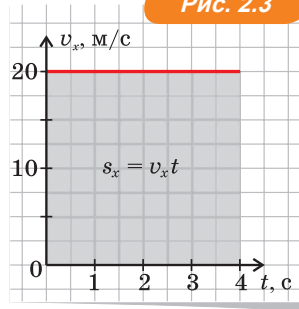


Рис. 2.4

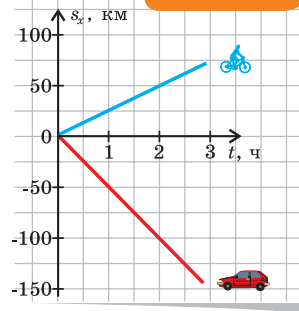


Рис. 2.5

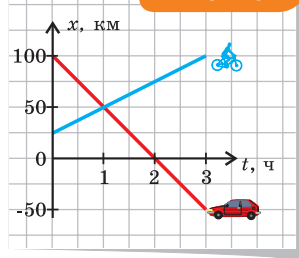
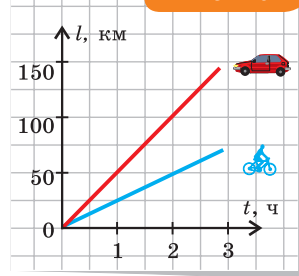


Рис. 2.6



### 3. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ

Прямолінійний рівномірний рух зустрічається досить рідко. Значно частіше ми спостерігаємо приклади нерівномірного руху.

*Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло проходить за рівні проміжки часу різні шляхи.*

Прикладами нерівномірного руху можуть служити падіння яблука з гілки дерева, розгін і гальмування автомобіля.

Для опису нерівномірного руху часто використовують середню швидкість.

*Середньою швидкістю нерівномірного руху  $\bar{v}_c$  за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення  $\bar{s}$  до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:*

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

Слова «за даний проміжок часу» вказують на те, що *за умови нерівномірного руху середня швидкість тіла за різні проміжки часу може бути різною.*

Наприклад, коли автомобіль розганяється, то його середня швидкість за першу секунду може дорівнювати  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а за другу секунду — вже  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . А для автобуса, що гальмує, навпаки, середня швидкість за кожну наступну секунду менша, ніж за попередню.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого воно за будь-які рівні проміжки часу здійснює рівні переміщення.
- Швидкість прямолінійного рівномірного руху дорівнює відношенню переміщення  $\bar{s}$  тіла до проміжку часу  $t$ , за який здійснено це переміщення:  $\bar{v} = \frac{\bar{s}}{t}$ . Швидкість — величина векторна.
- Формули залежності від часу переміщення, проекції переміщення та координати мають вигляд:  $\bar{s} = \bar{v}t$ ,  $s_x = v_x t$ ,  $x = x_0 + v_x t$ .
- Графіком залежності проекції переміщення від часу за умови прямолінійного рівномірного руху є відрізок прямої, один кінець якого збігається з початком координат. Чим більша швидкість тіла, тим більший кут між графіком залежності проекції переміщення від часу та віссю часу.
- Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло проходить за рівні проміжки часу різні шляхи.

- Середньою швидкістю нерівномірного руху за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$ .



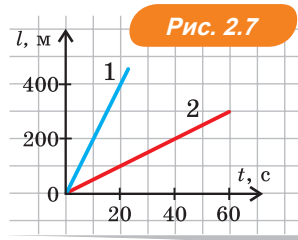
## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Наведіть приклади прямолінійного рівномірного руху.
2. Автомобіль рухається рівномірно по прямому шосе. З якою швидкістю їде автомобіль, якщо кожної хвилини він проїжджає повз кілометровий стовп?
3. Хороший спортсмен пробігає стометрівку за 10 с. Яка його швидкість у метрах за секунду та в кілометрах за годину?
4. Автомобіль їде зі швидкістю  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Яка його швидкість у кілометрах за годину?
5. Побудуйте на одному рисунку графіки залежності шляху від часу для двох автомобілів — синього і червоного. Синій рухається зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а червоний — зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Для якого автомобіля кут між графіком та віссю часу більший?
6. Що таке нерівномірний рух? Наведіть декілька прикладів такого руху.
7. Що таке середня швидкість? Як пов'язаний модуль середньої швидкості зі шляхом під час прямолінійного руху в одному напрямі?
8. Автомобіль за 1 год проїхав 60 км, потім 1 год стояв, а потім ще за 1 год проїхав 90 км. Автомобіль весь час рухався прямолінійним шосе в одному напрямі. Яка середня швидкість автомобіля?

### Другий рівень

9. Який вигляд має графік залежності шляху від часу за умови прямолінійного рівномірного руху? Намалюйте такі графіки для двох автомобілів, якщо швидкість першого автомобіля удвічі більша за швидкість другого.
10. На рис. 2.7 наведено графіки залежності шляху від часу для двох тіл, що рухаються прямолінійно. Знайдіть швидкість руху кожного з цих тіл. У скільки разів швидкість першого тіла більша за швидкість другого?
11. Який вигляд має графік залежності модуля швидкості від часу за умови прямолінійного рівномірного руху? Як можна знайти пройдений шлях за допомогою графіка швидкості?





12. Залежність координати тіла від часу в одиницях SI має вигляд  $x = -15 + 2,5t$ . З якою швидкістю рухається тіло та в якому напрямі відносно вісі  $x$ ? Через який час координата тіла дорівнюватиме 15 м?
13. Пасажир проїхав половину часу на автомобілі зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а половину часу — потягом зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Чому дорівнює його середня швидкість за весь час руху? Автомобіль та поїзд весь час рухалися по прямій в одному напрямі.
14. Пасажир проїхав першу половину шляху на автомобілі зі швидкістю  $100 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а другу половину шляху — потягом зі швидкістю  $60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Чому дорівнює його середня швидкість за весь час руху? Автомобіль весь час рухався прямолінійним шосе в одному напрямі. Чому відповідь цієї задачі відрізняється від відповіді попередньої?
15. Складіть задачу за темою «Прямолінійний рівномірний рух», відповіддю якої було б «Не наздожене».

## § 3. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ

1. Миттєва швидкість
2. Прискорення
3. Прямолінійний рівноприскорений рух
4. Вільне падіння

### 1. МИТТЄВА ШВИДКІСТЬ

Якщо швидкість тіла змінюється з часом, для опису руху треба знати, чому дорівнює швидкість тіла в *даній момент часу* (або в даній точці траєкторії). Цю швидкість називають *миттєвою швидкістю*.

Наочне уявлення про миттєву швидкість дає прилад для вимірювання швидкості автомобіля — *спідометр* (рис. 3.1).

Можна сказати, що *миттєва швидкість* — це *середня швидкість за дуже малий проміжок часу*. Під час руху зі змінною швидкістю середня швидкість, вимірювана за різні проміжки часу, буде різною. Проте якщо при вимірюванні середньої швидкості брати щораз менші проміжки часу, значення середньої швидкості наблизяться до деякого певного значення. Це і є миттєва швидкість у даний момент часу. Надалі, говорячи про швидкість тіла, ми матимемо на увазі його *миттєву швидкість*.

Поняття миттєвої швидкості добре ілюструє такий приклад зі знаменитих «Фейнманівських лекцій з фізики» (рис. 3.2).

Поліцейський зупиняє машину, і між ним та жінкою за кермом відбувається така розмова.

— Ви порушили правила дорожнього руху: їхали зі швидкістю 90 кілометрів за годину.

— Я всього 7 хвилин тому виїхала з дому, як же я могла проїхати 90 кілометрів за годину?

— Але якби ви продовжували так їхати, то ви проїхали б за годину 90 кілометрів.

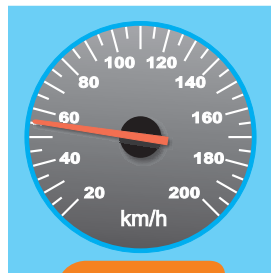


Рис. 3.1



— А я й не збиралася так їхати аж годину! Я збиралася проїхати ще один квартал і зупинитися.

Як би ви на місці поліцейського довели, що правила дорожнього руху все-таки було порушено?

## 2. ПРИСКОРЕННЯ

Якщо швидкість тіла під час руху змінюється, виникає питання: якою є «швидкість зміни швидкості»? Ця величина, яку називають *прискоренням*, відіграє дуже важливу роль у всій механіці: незабаром ми побачимо, що прискорення тіла визначається діючими на це тіло силами.

Нехай швидкість тіла в момент часу  $t_1$  дорівнювала  $\vec{v}_1$ , а в момент часу  $t_2$  стала рівною  $\vec{v}_2$ . Позначимо *зміну* швидкості  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ , а проміжок часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

*Прискоренням* називають<sup>1</sup> відношення зміни швидкості тіла до проміжку часу, за який ця зміна відбулася:

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

Як впливає з визначення, прискорення — величина *векторна*. Напрямок прискорення збігається з напрямком вектора *зміни швидкості*  $\Delta\vec{v}$ .

### *Приклади:*

1. Коли автомобіль розганяється, його прискорення напрямлене в той же бік, що і швидкість.
2. Коли автомобіль гальмує, його прискорення напрямлене протилежно швидкості.

<sup>1</sup> Це визначення середнього прискорення за час  $\Delta t$ . Миттєвим прискоренням називають середнє прискорення за дуже малий проміжок часу.

**Одиниця прискорення** в SI:  $1 \text{ м/с}^2$ . Якщо тіло рухається в певному напрямі з прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ , його швидкість змінюється щосекунди на  $1 \text{ м/с}$ .

Термін «прискорення» використовують у фізиці, коли мова йде про *будь-яку* зміну швидкості, у тому числі й тоді, коли модуль швидкості зменшується або коли модуль швидкості залишається незмінним і швидкість змінюється тільки за напрямом.

### 3. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ

*Прямолінійним рівноприскореним<sup>1</sup> рухом* називають прямолінійний рух тіла з постійним прискоренням.

Прикладами такого руху є падіння тіл зі стану спокою, якщо можна знехтувати опором повітря, а також рух тіла вздовж похилої площини.

#### ШВИДКІСТЬ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

З визначення прискорення  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  випливає:  $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$ .

Отже,

під час прямолінійного рівноприскореного руху швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на ту ж саму величину.

Позначимо  $\vec{v}_0$  швидкість тіла в початковий момент (при  $t = 0$ ), а  $\vec{v}$  — швидкість тіла в момент часу  $t$ . Тоді  $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ , а  $\Delta t = t$ , тому формула  $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$  набуде вигляду  $\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}t$ . Звідси випливає:

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

Якщо направити вісь  $x$  уздовж прямої, по якій рухається тіло, то в проекціях на вісь  $x$  отримаємо:

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

Таким чином, за умови прямолінійного рівноприскореного руху проекція швидкості *лінійно* залежить від часу. Це означає, що *графіком залежності  $v_x(t)$  є відрізок прямої*.

На рис. 3.3 наведено графік швидкості автомобіля, що розганяється, а на рис. 3.4 — автомобіля, що гальмує. Для першого

<sup>1</sup> Прямолінійний рівноприскорений рух називають іноді рівномірним. Рух з прискоренням, яке дорівнює нулю, ми будемо розглядати як рівномірний прямолінійний рух.

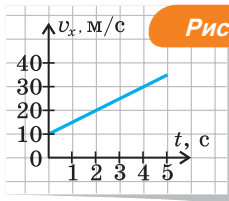


Рис. 3.3

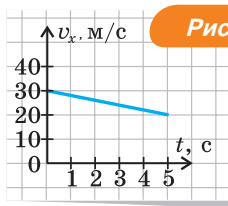


Рис. 3.4

автомобіля  $v_{0x} = 10$  м/с,  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $a_x \gg 0$ . Для другого

автомобіля  $v_{0x} = 30$  м/с,  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = -2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $a_x < 0$ .

### ПЕРЕМІЩЕННЯ ТІЛА ПІД ЧАС ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

Нагадаємо спочатку, що за умови *рівномірного* руху проекція переміщення  $s_x$  чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ .

Це справедливо і для *нерівномірного* руху. Приклад графіка залежності проекції швидкості від часу для такого руху наведено на рис. 3.5, а. Увесь час руху можна розбити на такі малі проміжки часу, що протягом кожного з них рух тіла можна вважати практично рівномірним. Схематично це показано на рис. 3.5, б.

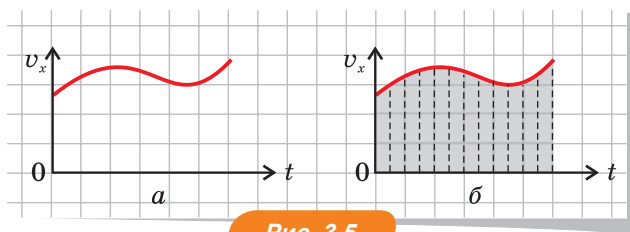


Рис. 3.5

Скористаємося цим, щоб знайти, як залежить переміщення від часу за умови прямолінійного рівноприскореного руху.

Якщо початкова швидкість тіла дорівнює нулю, фігура, обмежена графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , — трикутник площею  $a_x t^2 / 2$  (рис. 3.6).

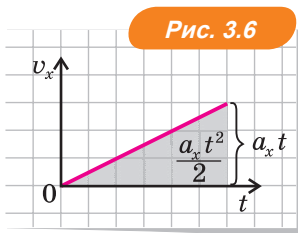


Рис. 3.6

Користуючись формулою для площі прямокутного трикутника, отримуємо, що

при прямолінійному рівноприскореному русі без початкової швидкості

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Якщо ж початкова швидкість тіла не дорівнює нулю, то фігура, обмежена графіком  $v_x(t)$  і віссю  $t$ , є *трапецією*, що складається з *прямокутника* площею  $v_{0x}t$  і *трикутника* площею  $a_x t^2/2$  (рис. 3.7).

Отже,

за умови прямолінійного рівноприскореного руху з початковою швидкістю  $v_0$

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

**Залежність координати від часу.**

Оскільки  $x = x_0 + s_x$ , отримуємо

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

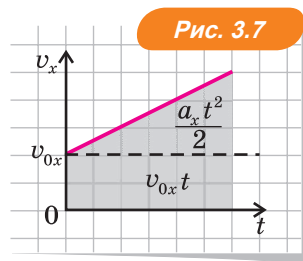
**Середня швидкість під час прямолінійного рівноприскореного руху.** Користуючись виведеними вище формулами, легко довести, що  $v_{cx} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}$ . Це співвідношення спрощує розв'язання багатьох задач.

**Співвідношення між переміщенням і швидкістю.** Для розв'язування задач, в умові яких *не задано часу руху*, корисні формули, що пов'язують переміщення з початковою і кінцевою швидкостями. З формул  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2}t$  і  $t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}$

отримуємо:  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ . Якщо початкова швидкість дорівнює нулю, ця формула набуває вигляду  $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$ .

#### 4. ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ

Наприкінці 16-го століття італійський учений Галілей зробив важливе відкриття: вивчаючи падіння тіл, він виявив на дослідах, що коли опором повітря можна знехтувати, то всі тіла, падаючи, рухаються *рівноприскорено з однаковою прискоренням*.



Падіння тіла за умов, коли опором повітря можна знехтувати, називають *вільним падінням*.

Відкриття Галілея було згодом підтверджено в багатьох дослідах. У цих дослідах було також виміряно прискорення тіл під час вільного падіння. Поблизу поверхні Землі воно виявилось рівним приблизно  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Це прискорення називають *прискоренням вільного падіння* і позначають  $\vec{g}$ . У різних точках земної поверхні значення  $g$  трохи відрізняються (у межах  $0,5 \%$ ). Для приблизних обчислень часто приймають  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**Залежність швидкості і координати падаючого тіла від часу.** Якщо тіло вільно падає без початкової швидкості, то  $\vec{v} = \vec{g}t$ .

Зручно сумістити початок координат із початковим положенням тіла і направити вісь  $y$  *униз*: тоді проекції прискорення, швидкості і переміщення будуть додатними. З формули  $\vec{v} = \vec{g}t$  випливає:  $v_y = gt$ . Під час вільного падіння швидкість тіла збільшується щосекунди приблизно на  $10 \text{ м/с}$ .

Оскільки  $y_0 = 0$ , одержуємо  $y = \frac{gt^2}{2}$ .

**Рух тіла з початковою швидкістю.** З прискоренням вільного падіння  $\vec{g}$  рухаються також тіла, кинуті з деякою початковою швидкістю<sup>1</sup>.

Отже, залежність від часу швидкості  $\vec{v}$  тіла, кинутого з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ , виражається формулою

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t.$$

Розглянемо випадок, коли тіло кинуте вгору. Сумістимо початок координат з початковим положенням тіла і направимо вісь  $y$  вертикально вгору. Тоді проекції швидкості і переміщення під час руху вгору будуть додатними.

З формули  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$  випливає:

$$v_y = v_0 - gt.$$

Оскільки  $y_0 = 0$ , одержуємо  $y = v_0t - \frac{gt^2}{2}$ .

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Миттєвою швидкістю називають швидкість тіла в даний момент часу (або в даній точці траєкторії).

<sup>1</sup> Припускається, що опором повітря можна знехтувати. Рух тіл за таких умов також називають іноді вільним падінням.

- Прискоренням тіла  $\vec{a}$  називають відношення зміни швидкості тіла до проміжку часу, за який ця зміна відбулася:  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ .
- Прямолінійним рівноприскореним рухом називають рух тіла вздовж прямої з постійним прискоренням. За умови прямолінійного рівноприскореного руху швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на ту ж саму величину.
- За умови прямолінійного рівноприскореного руху:
  - Швидкість  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ .
  - Проекція швидкості  $v_x = v_{0x} + a_x t$ .
  - Проекція переміщення під час руху без початкової швидкості  $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$ .
  - Проекція переміщення під час руху з початковою швидкістю  $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ .
  - Залежність координати від часу під час руху з початковою швидкістю  $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ .
  - Середня швидкість  $v_{c.x} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}$ .
  - Співвідношення між переміщенням і швидкістю: а) без початкової швидкості:  $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$ ; б) із початковою швидкістю:  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ .
- Вільним падінням називають падіння тіла за умови, що опором повітря можна знехтувати.
- Під час вільного падіння поблизу поверхні Землі всі тіла рухаються з однаковим прискоренням, яке називають прискоренням вільного падіння і позначають  $\vec{g}$ . З досліду випливає, що  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .
- Залежність швидкості від часу за умови руху вільного падіння:  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ .



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Що таке миттєва швидкість? За допомогою якого приладу вимірюють миттєву швидкість автомобіля?
2. Який рух називають прямолінійним рівноприскореним? Наведіть приклад такого руху.
3. Що таке прискорення?

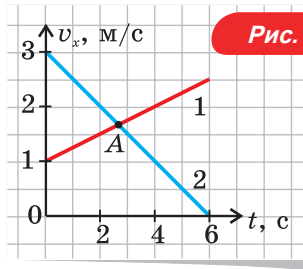


4. Як залежить модуль швидкості від часу за умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості? з початковою швидкістю?
5. Чому дорівнює прискорення вільного падіння?
6. Як напрямлене прискорення тіла, кинутого вертикально вгору, під час піднімання?
7. Тіло кидають вертикально вгору зі швидкістю  $25 \frac{M}{C}$ . За який час тіло підніметься до найвищої точки?
8. Автомобіль рухається прямолінійно рівноприскорено в одному напрямі. За 6 с швидкість автомобіля збільшилася на  $12 \frac{M}{C}$ . З яким прискоренням він рухається?
9. Автомобіль, що їде зі швидкістю 10 м/с, почав розганятися. Якою стане його швидкість через 5 с, якщо прискорення автомобіля  $1 \frac{M}{C^2}$ ?
10. Чому дорівнює швидкість тіла, що вільно падає, через 1 с після початку падіння? через 3 с?
11. Побудуйте графік залежності проекції швидкості від часу для гальмуючого автомобіля, який рухається прямолінійно рівноприскорено, якщо початкова швидкість дорівнює  $10 \frac{M}{C}$ , а прискорення  $2 \frac{M}{C^2}$ .

### Другий рівень

12. Автомобіль рухається прямолінійно рівноприскорено. За 5 с його швидкість зменшилася вдвічі й тепер дорівнює  $10 \frac{M}{C}$ . З яким прискоренням рухається автомобіль? Через який час він зупиниться, якщо рухатиметься з тим самим прискоренням?
13. Через який час після початку падіння швидкість тіла, що вільно падає, дорівнюватиме швидкості автомобіля, що їде зі швидкістю  $72 \frac{KM}{Ч}$ ?
14. Автомобіль їде прямолінійно рівноприскорено на північ. Як напрямлене прискорення автомобіля, якщо його швидкість збільшується? зменшується?
15. Як напрямлене прискорення тіла, кинутого вертикально вгору, у верхній точці траєкторії?
16. М'яч кинули вертикально вгору зі швидкістю  $10 \frac{M}{C}$ . Через який час м'яч досягне найвищої точки?
17. Два тіла падають з однієї точки без початкової швидкості. Друге тіло почало рухатися через 1 с після першого. Як ці тіла рухаються одне відносно одного?

18. Побудуйте графік залежності проекції швидкості автомобіля від часу, якщо він рухається з прискоренням  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Початкова швидкість автомобіля дорівнює  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Автомобіль рухається прямолінійно. Напрямок прискорення збігається з напрямком початкової швидкості.
19. За графіками  $v_x(t)$  (див. рис. 3.8) опишіть рухи двох тіл. Чи відповідає точка  $A$  на рисунку моменту зустрічі тіл? Запишіть залежність  $v_x(t)$  для кожного з тіл.



20. Прямолінійний рух тіла задано в одиницях SI формулою  $x = -4 + 2t - t^2$ . Опишіть рух тіла та побудуйте для нього графіки  $v_x(t)$ ,  $s_x(t)$ ,  $l(t)$ .
21. Складіть задачу за темою «Прямолінійний рівноприскорений рух», відповіддю якої було б « $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ».

## § 4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

1. Рівняння руху
2. Робота з графіками
3. Шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні проміжки часу
4. Задачі, в умові яких не дано часу руху
5. Середня швидкість під час прямолінійного рівноприскореного руху

### 1. РІВНЯННЯ РУХУ

Нагадаємо, що за умови прямолінійного рівноприскореного руху вздовж осі  $x$  залежність координати  $x$  від часу виражається формулою  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

#### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Рівняння руху тіл, що рухаються вздовж осі  $x$ , мають вигляд (усі величини задано в одиницях SI):

а)  $x = 5 + 3t - 6t^2$ ;

б)  $x = 4 + 3t$ ;

в)  $x = -2 - 4t + 3t^2$ ;

г)  $x = 3 - 7t - 2t^2$ .

Які з цих тіл рухаються рівноприскорено? Чому дорівнюють при цьому проекція початкової швидкості  $v_{0x}$  і проекція прискорення  $a_x$ ? У яких випадках на початку руху тіло рухається в додатному напрямі осі  $x$ ? У яких випадках швидкість тіла на початку руху збільшується за модулем?

**Розв'язання.** За умови рівноприскореного руху згідно з формулою залежності координати від часу рух є рівноприскореним тільки у випадках а, в і г. Порівнюючи формули а, в і г із рівнянням  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ , одержуємо для цих випадків:

а)  $v_{0x} = 3$  м/с,  $a_x = -12$  м/с<sup>2</sup>;

в)  $v_{0x} = -4$  м/с,  $a_x = 6$  м/с<sup>2</sup>;

г)  $v_{0x} = -7$  м/с,  $a_x = -4$  м/с<sup>2</sup>.

Напрямок руху визначається знаком проекції швидкості: якщо вона додатна, тіло рухається в додатному напрямі осі  $x$ .

На початку руху напрям руху визначається знаком проекції початкової швидкості. Ця проекція додатна у випадках а і б.

Швидкість тіла під час рівноприскореного руху збільшується за модулем, якщо проекція прискорення має той самий знак, що і проекція швидкості, і зменшується, якщо ці проекції мають протилежні знаки. Таким чином, на початку руху швидкість збільшується за модулем тільки у випадку г. При цьому тіло рухається у від'ємному напрямі осі  $x$ . У випадках же а і в швидкість тіла на початку руху зменшується за модулем.

## 2. РОБОТА З ГРАФІКАМИ

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

На рис. 4.1 наведено графік  $v_x(t)$  для тіла, що рухається вздовж осі  $x$ . Побудуйте графіки  $a_x(t)$ ,  $s_x(t)$ ,  $x(t)$  і  $l(t)$ , вважаючи, що початкова координата тіла  $x_0 = 2$  м.

**Розв'язання.** Тіло рухається рівноприскорено, оскільки графік  $v_x(t)$  — відрізок прямої. Отже,  $v_x(t) = v_{0x} + a_x t$ . Проекція початкової швидкості  $v_{0x} = v_x(0) = 4$  м/с.

У момент  $t = 2$  с проекція швидкості дорівнює нулю:  $v_x(2) = 4 + a_x \cdot 2 = 0$ . Звідси  $a_x = -2$  м/с<sup>2</sup>.

Оскільки прискорення є постійним, графіком  $a_x(t)$  є відрізок прямої, паралельної осі  $t$  (рис. 4.2).

Проекція переміщення під час рівноприскореного руху описується формулою

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

Підставляючи у цю формулу знайдені значення  $v_{0x} = 4$  м/с і  $a_x = -2$  м/с<sup>2</sup>, одержуємо

$$s_x(t) = 4 \cdot t + \frac{(-2) \cdot t^2}{2} = 4t - t^2.$$

Отже, графіком  $s_x(t)$  є парабола, що проходить через початок координат (рис. 4.3). Вершина цієї параболи знаходиться при  $t = 2$  с ( $s_x = 4$  м).

Графік  $x(t)$  відрізняється від графіка  $s_x(t)$  тільки зсувом на  $x_0 = 2$  м по осі ординат (рис. 4.4).

Рис. 4.1

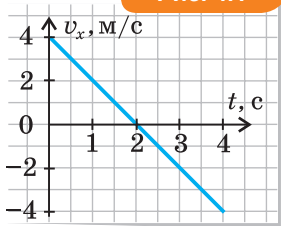


Рис. 4.2

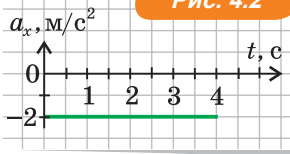
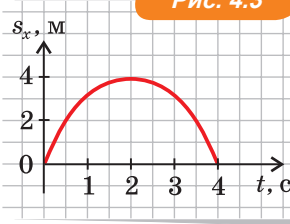
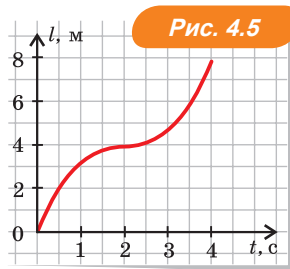
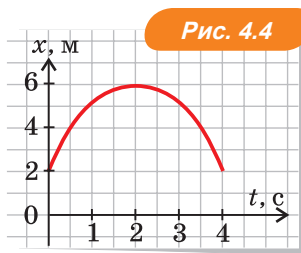


Рис. 4.3





При побудові графіка залежності шляху від часу  $l(t)$  врахуємо, що *шлях не може убувати з часом* (рис. 4.5).

### 3. ШЛЯХИ, ЯКІ ПРОХОДИТЬ ТІЛО ЗА ПОСЛІДОВНІ РІВНІ ПРОМІЖКИ ЧАСУ

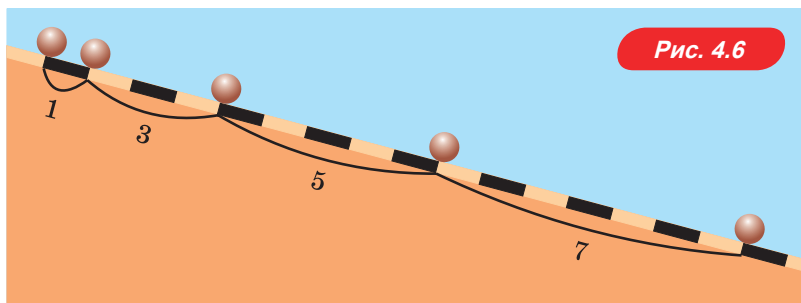
Основні властивості прямолінійного рівноприскореного руху визначив Галілей. Наприклад, він установив таку чудову властивість:

за умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні проміжки часу, відносяться як послідовні непарні числа (1:3:5:7...).

Цю властивість прямолінійного рівноприскореного руху схематично проілюстровано на рисунку 4.6.

Доведемо її для трьох перших послідовних проміжків часу (якщо бажаєте, продовжіть доведення самостійно).

Скористаємося тим, що шлях чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності модуля швидкості від часу. На рисунку 4.7, *a* шляхи, пройдені за кожний із трьох перших послідовних рівних проміжків часу (для визначеності ми взяли по 1 с кожний), чисельно дорівнюють площам жов-



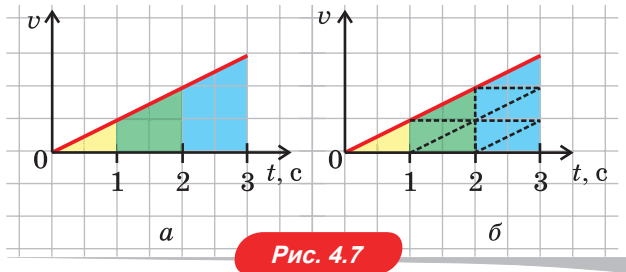


Рис. 4.7

тої, зеленої та синьої фігур. Розіб'ємо всі фігури, крім першої, на трикутники, площа кожного з яких дорівнює площі першої фігури (рис. 4.7, б). Ця розбивка наочно показує, що шляхи, які проходить тіло за три перші послідовні рівні проміжки часу, відносяться як 1:3:5.

#### 4. ЗАДАЧІ, В УМОВІ ЯКИХ НЕ ДАНО ЧАСУ РУХУ

У деяких задачах потрібно знайти пройдений тілом шлях за умови, що час руху невідомий, але відомі прискорення та початкова чи кінцева швидкість тіла.

Якщо початкова швидкість дорівнює нулю, час руху можна виразити через модуль кінцевої швидкості та прискорення:

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

Підставляючи цей вираз у формулу для шляху  $l = \frac{at^2}{2}$ , отримаємо

$$l = \frac{v^2}{2a}.$$

З цієї формули випливає, зокрема, що за умови вільного падіння висота  $h$ , з якої падає тіло, та його кінцева швидкість пов'язані співвідношенням

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Це співвідношення дозволяє визначити *кінцеву швидкість тіла під час падіння із заданої висоти*:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Якщо тіло має початкову швидкість  $v_0$  і швидкість тіла зменшується, рух тіла до його зупинки триває протягом

часу, що дорівнює  $\frac{v_0}{a}$ . Відстань, пройдену тілом до зупинки,

знаходимо з формули  $l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ , підставивши в неї замість  $t$  час руху тіла до зупинки, тобто  $\frac{v_0}{a}$ . Ми отримаємо, що до повної зупинки тіло пройде шлях  $l = \frac{v_0^2}{2a}$ .

Зверніть увагу: цей шлях (для засобів транспорту його називають *гальмівним шляхом*) пропорційний *квадрату* початкової швидкості!

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Під час гальмування на сухому асфальті автомобіль рухається з прискоренням, що дорівнює за модулем  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чому дорівнює гальмівний шлях автомобіля, якщо він їде зі швидкістю  $72 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ ? Яким буде його гальмівний шлях у разі ожеледі, коли модуль прискорення  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?

**Дано:**

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

$$a_1 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$a_2 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$l_1 = ?$$

$$l_2 = ?$$

**Розв'язання**

Під час руху до зупинки автомобіль пройде шлях  $l = \frac{v_0^2}{2a}$ .

Перевіримо одиниці величин:

$$[l] = \frac{\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення й отримаємо

$$l_1 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 5} = 40 \text{ (м)};$$

$$l_2 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 2} = 100 \text{ (м)}.$$

**Відповідь:** 40 м; 100 м.

Зверніть увагу: гальмуючи в умовах ожеледі, автомобіль проїжджає відстань у 2,5 рази більшу, ніж під час гальмування на сухому асфальті!

## 5. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ПІД ЧАС ПРЯМОЛІНІЙНОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

Доведемо, що

під час прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості середня швидкість тіла дорівнює половині кінцевої швидкості.

Під час прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості шлях  $l = \frac{at^2}{2}$ , а кінцева швидкість  $v = at$ . Тому вираз для шляху можна записати у вигляді  $l = \frac{vt}{2}$ . Згадаймо тепер, що за умови прямолінійного руху в одному напрямі модуль середньої швидкості  $v_c = \frac{l}{t}$ . Порівнюючи дві останні формули, отримуємо

$$v_c = \frac{v}{2}.$$

Доведення закінчено.

Пропонуємо вам самим довести, що

під час прямолінійного рівноприскореного руху, коли кінцева швидкість дорівнює нулю, середня швидкість тіла дорівнює половині його початкової швидкості.

Ці властивості середньої швидкості прямолінійного рівноприскореного руху дозволяють значно спростити розв'язання деяких задач. Розглянемо приклад.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Автомобіль почав гальмувати, коли його швидкість дорівнювала  $72 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Скільки часу тривало гальмування до зупинки, якщо гальмівний шлях 200 м?

Дано:

$$v = 72 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$l = 200 \text{ м}$$

$$t = ?$$

Розв'язання

$$\text{Середня швидкість } v_c = \frac{v}{2};$$

$$t = \frac{l}{v_c} = \frac{l}{\frac{v}{2}} = \frac{2l}{v}.$$



Перевіримо одиниці величин:

$$[t] = \frac{\frac{\text{м}}{\text{м}}}{\text{с}} = \text{с}.$$

Підставимо числові значення й отримаємо

$$t = \frac{2 \cdot 200}{20} = 20 \text{ (с)}.$$

**Відповідь:** 20 с.



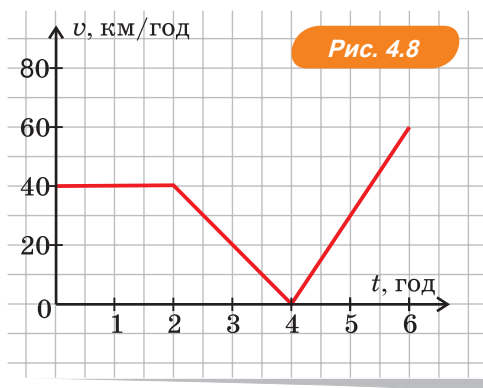
## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Напишіть рівняння залежності шляху, пройденого тілом, від часу, якщо тіло рухається зі стану спокою рівноприскорено з прискоренням  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?
2. Тіло рухалося прямолінійно рівноприскорено без початкової швидкості. Прискорення тіла  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Який шлях тіло пройшло за 1 с? за 2 с? за другу секунду?
3. Рухаючись прямолінійно рівноприскорено без початкової швидкості, тіло пройшло за першу секунду 3 м. Який шлях пройде це тіло за 2 с? за 3 с?
4. З якої висоти вільно падало тіло, якщо падіння тривало 2 с?
5. Яка кінцева швидкість тіла під час падіння з висоти 20 м?
6. Автомобіль рушив з місця і рухався з прискоренням  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чому дорівнює швидкість автомобіля через 2 с? Який шлях пройде автомобіль за вказаний час?
7. Чому дорівнює гальмівний шлях автомобіля, якщо його початкова швидкість  $30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а модуль прискорення під час гальмування  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?
8. Автомобіль рухався зі швидкістю  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . У деякий момент він почав розганятися з прискоренням  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Який шлях він проїхав за 3 с розгону?

## Другий рівень

9. На рис. 4.8 зображено графік залежності модуля швидкості від часу для автомобіля, що їхав в одному напрямі. Чому дорівнює шлях, пройдений за 2 год? за 4 год? за 6 год?



10. Два тіла почали рух одночасно. Перше тіло рухається прямолінійно рівномірно, а друге — прямолінійно рівноприскорено. За першу секунду руху обидва тіла пройшли однаковий шлях. Яке тіло пройде більший шлях за 2 секунди? У скільки разів більший?
11. Два тіла рухаються прямолінійно, причому залежність координати від часу для них описується формулами:  $x_1 = 16 - 18t + 3t^2$ ,  $x_2 = -20 + 15t - 2,5t^2$ . Опишіть рух кожного з тіл, побудуйте для них графіки  $v_x(t)$ .
12. Тіло кинуте вертикально вгору зі швидкістю  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . На яку висоту воно підніметься?
13. Кулька скочується похилою площиною завдовжки 90 см за 3 с. Яку відстань проходить кулька за кожну секунду?
14. Доведіть, що під час прямолінійного рівноприскореного руху в одному напрямі середня швидкість тіла дорівнює півсумі початкової та кінцевої швидкостей.
15. Санчата скотилися схилом гори завдовжки 48 м за 16 с. Яка швидкість санчат у кінці спуску? Рух санчат можна вважати рівноприскореним з початковою швидкістю, що дорівнює нулю.
16. Автомобіль рухається рівноприскорено. Початкова швидкість  $40 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ , а кінцева швидкість  $80 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Автомобіль проїхав при цьому 1 км. Скільки часу він їхав по цій ділянці?

17. Автомобіль гальмував протягом 5 с. При цьому швидкість автомобіля зменшилася з 30 до  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Який шлях проїхав автомобіль за час гальмування?
18. Виведіть формулу  $l = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$ , де позначення фізичних величин відповідають позначенням у тексті параграфа.
19. Куля, яка вилетіла з рушниці, пробила піщаний вал. При цьому швидкість кулі зменшилася з 500 до  $300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Рух кулі всередині валу можна вважати рівноприскореним. З яким прискоренням рухалася куля всередині валу, якщо його товщина 1 м? Скільки часу рухалася куля всередині валу?
20. Поїзд почав гальмувати при швидкості 72 км/год. Яка його швидкість після проходження половини гальмівного шляху?
21. Складіть задачу за темою «Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху», відповіддю якої було б «125 м».

## § 5. РІВНОМІРНИЙ РУХ ПО КОЛУ

---

1. Модуль та напрям швидкості за умови рівномірного руху по колу
2. Кутова швидкість
3. Період обертання та обертова частота
4. Прискорення за умови рівномірного руху по колу

### 1. МОДУЛЬ ТА НАПРЯМ ШВИДКОСТІ ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО РУХУ ПО КОЛУ

Рух Місяця навколо Землі та планет навколо Сонця приблизно можна вважати *рівномірним рухом по колу*.

Рівномірний рух по колу часто відбувається в техніці, наприклад, так рухаються частини обертових механізмів.

Нагадаємо, що за умови рівномірного руху тіло проходить рівні шляхи за будь-які рівні проміжки часу. При цьому миттєва швидкість тіла залишається постійною *за модулем*. Далі ми, як зазвичай, називатимемо миттєву швидкість просто швидкістю.

Отже,

за умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається постійним.

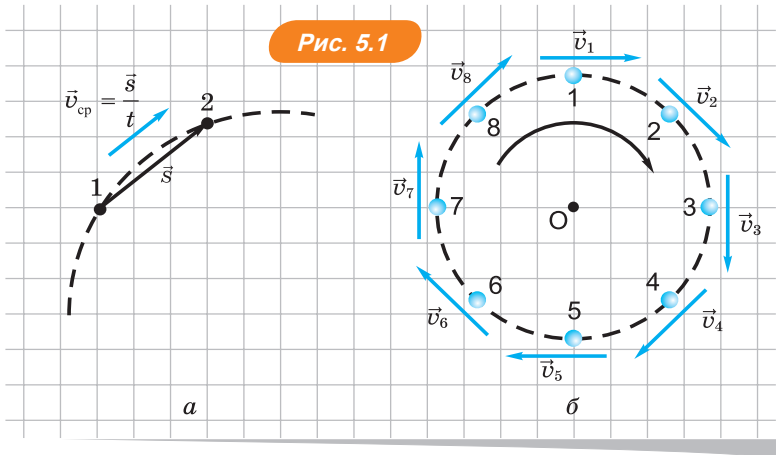
А що ж змінюється? Змінюється *напрямок швидкості*. Покажемо, що

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

Нагадаємо, що *миттєва* швидкість у даний момент — це середня швидкість тіла за дуже малий проміжок часу, що включає даний момент.

З формули  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$  випливає, що середня швидкість за цей проміжок часу напрямлена так само, як переміщення  $\vec{s}$ .

Нехай за малий проміжок часу  $t$  тіло, що рухається по колу, перемістилося з точки 1 у точку 2 (рис. 5.1, а). Коли проміжок часу  $t$  зменшується, точки 1 і 2 зближуються. При цьому напрям переміщення  $\vec{s}$ , а разом з ним і напрям швидкості наближаються до напрямку *дотичної* до кола в цій точці. Доведення закінчено.



Пригадайте, до речі, що саме по дотичній летять іскри під час заточування інструмента на точильному камені, що обертається.

На рисунку 5.1, б зображено швидкість тіла в різних точках траєкторії за умови рівномірного руху по колу. Зверніть увагу, що на рисунках вектор швидкості тіла розташовують поряд з тілом.

## 2. КУТОВА ШВИДКІСТЬ

Якщо матеріальна точка рівномірно рухається по колу, то радіус, проведений до цієї точки, за певний час робить поворот на певний кут — *кут повороту*.

Відношення кута повороту при рівномірному русі матеріальної точки по колу до проміжку часу, за який цей поворот був здійснений, називають *кутовою швидкістю* і позначають  $\omega$ .

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

Одиницею кутової швидкості є  $1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

## 3. ПЕРІОД ОБЕРТАННЯ ТА ОБЕРТОВА ЧАСТОТА

Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають *періодом обертання* і позначають  $T$ .

Визначимо, чому дорівнює період обертання  $T$ , якщо тіло рухається по колу радіусом  $R$  зі швидкістю  $v$ .

За час одного повного оберту  $T$  тіло проходить шлях  $l = 2\pi R$ , що дорівнює довжині кола.

Тому

за умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Це співвідношення дозволяє знайти будь-яку з величин  $v$ ,  $R$  і  $T$ , якщо відомі дві інші.

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

**Яка швидкість руху Землі на її орбіті навколо Сонця? Виразіть цю швидкість у кілометрах за секунду. Відстань від Землі до Сонця можна прийняти рівною 150 млн км.**

**Розв'язання.** Період  $T$  обертання Землі під час її руху навколо Сонця дорівнює 1 року. Виражаючи період у секундах, отримаємо  $T = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$ . Отже,

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ с}} = 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

**Відповідь:**  $30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

Число повних обертів за 1 с називають *обертовою частотою* і позначають  $n$ .

Одиницею обертової частоти є  $\frac{1}{\text{с}}$ . Вона не завжди виражається цілим числом. Наприклад, якщо тіло робить повний оберт за 2 с, то  $n = 0,5 \frac{1}{\text{с}}$ .

Доведемо, що

*період і обертова частота є взаємооберненими величинами:*

$$T = \frac{1}{n}, \text{ а } n = \frac{1}{T}.$$

Припустимо, що тіло зробило  $N$  повних обертів за час  $t$ . Тоді період обертання

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

а число обертів за секунду, тобто обертова частота

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

Отримані вирази для  $T$  і  $n$  є взаємооберненими.

З визначення кутової швидкості, періоду обертання та кутової швидкості випливає, що вони пов'язані співвідношеннями:

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

#### 4. ПРИСКОРЕННЯ ЗА УМОВИ РІВНОМІРНОГО РУХУ ПО КОЛУ

Як ми бачили, за умови рівномірного руху по колу *напрям* швидкості весь час *змінюється*. А *будь-яка* зміна швидкості тіла — у тому числі й тільки за напрямом — означає, що тіло *рухається з прискоренням*.

Можна показати, що

за умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра<sup>1</sup> кола.

Наприклад, під час руху по орбітах навколо Сонця Земля та інші планети рухаються з *прискоренням, напрямленим до Сонця* (рис. 5.2). І. Ньютон першим здогадався, що причиною цього прискорення є притягання всіх планет Сонцем. Ми розповімо про це в § 10. *Закон всесвітнього тяжіння*.

Можна довести, що

за умови рівномірного руху по колу модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.

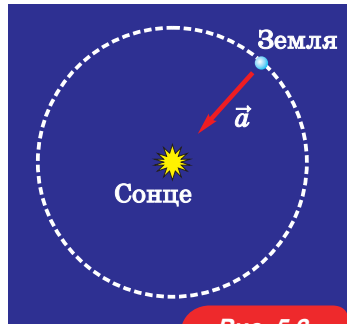


Рис. 5.2

<sup>1</sup> Тому це прискорення називають *доцентровим*.

Цю формулу ми використовуємо для розрахунку швидкості, якої треба надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі (див. § 10. Закон всесвітнього тяжіння).

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- За умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається постійним, а напрям швидкості змінюється: у будь-якій точці траєкторії швидкість напрямлена по дотичній до кола в цій точці.
- Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають періодом обертання і позначають  $T$ .
- Число повних обертів за 1 с називають обертовою частотою і позначають  $n$ .

- Період і обертова частота є взаємооберненими величинами:

$$T = \frac{1}{n}, \text{ а } n = \frac{1}{T}.$$

- За умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням  $v = \frac{2\pi R}{T}$ .

- За умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра кола.

- За умови рівномірного руху по колу модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.

### ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Як напрямлена швидкість тіла під час руху по колу?
2. Що таке період обертання й обертова частота? Як вони пов'язані?
3. Період обертання дорівнює 10 с. Чому дорівнює частота?
4. Чому дорівнює період обертання, якщо обертова частота дорівнює 10 1/с?
5. Чому дорівнює період обертання годинникової стрілки годинника? хвилинної? секундної?
6. Чому дорівнює період обертання Землі навколо Сонця?



7. Як пов'язані період обертання  $T$ , швидкість тіла  $v$  і радіус  $R$  кола під час рівномірного руху тіла по колу?
8. Як напрямлене прискорення тіла під час рівномірного руху по колу?

### Другий рівень

9. У скільки разів обертова частота хвилинної стрілки годинника більша за обертову частоту годинникової стрілки?
10. З якою швидкістю рухаються кінці годинникової, хвилинної та секундної стрілок настінного годинника? Вважайте, що довжина кожної з цих стрілок 10 см.
11. З яким доцентровим прискоренням рухається точка на ободі велосипедного колеса радіусом 0,5 м, якщо обертова частота дорівнює  $4 \frac{1}{с}$ ?
12. Оцініть, з якою швидкістю рухається Місяць навколо Землі. Радіус орбіти Місяця прийміть рівним 400 тис. км. Згадайте самі, який проміжок часу треба взяти за період.
13. Під час полярного дня полярник, який перебуває на крижині поблизу Північного полюса, здійснив «кругосвітню подорож» за одну добу по колу з центром у Північному полюсі так, що Сонце весь час було прямо перед ним. Який радіус цього кола, якщо він рухався зі швидкістю 4 км/год?
14. Який радіус кола, по якому їде автомобіль, якщо його прискорення при швидкості 72 км/год дорівнює половині прискорення вільного падіння?
15. Складіть задачу за темою «Рівномірний рух по колу», відповіддю якої було б «3 с».

## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- Механіка вивчає рух і взаємодію тіл.
- Кінематика описує рух тіл, але не вивчає взаємодію тіл.
- Механічним рухом називають зміну з часом положення тіла в просторі відносно інших тіл.
- Фізичну модель тіла, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати, називають матеріальною точкою.
- Тіло відліку, пов'язані з ним система координат та годинник утворюють систему відліку.
- Лінію в просторі, уздовж якої рухається тіло, називають траєкторією руху тіла. Довжину траєкторії руху тіла називають шляхом, пройденим тілом.
- Переміщенням тіла за даний проміжок часу називають напрямлений відрізок, що сполучає положення тіла в початковий момент цього проміжку часу з положенням тіла в кінцевий момент цього проміжку часу. Переміщення є вектором.
- Прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух тіла, під час якого воно за будь-які рівні проміжки часу здійснює рівні переміщення.
- Швидкістю  $\vec{v}$  прямолінійного рівномірного руху називають фізичну величину, що дорівнює відношенню переміщення  $\vec{s}$  до проміжку часу  $t$ , за який відбулося це переміщення:  $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ . Швидкість — величина векторна. Під час прямолінійного рівномірного руху  $v = \frac{l}{t}$ .
- Графіком залежності шляху від часу за умови прямолінійного рівномірного руху є відрізок прямої, один кінець якого збігається з початком координат.
- Площа фігури під графіком залежності модуля швидкості від часу чисельно дорівнює шляху, пройденому тілом.
- Нерівномірним рухом називають такий рух, під час якого тіло за рівні проміжки часу проходить різні шляхи.
- Середньою швидкістю нерівномірного руху  $\vec{v}_c$  за даний проміжок часу  $t$  називають фізичну величину, що дорівнює від-

ношенню переміщення  $\vec{s}$  до проміжку часу, за який це переміщення відбулося:  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$ .

- Прямолінійний рух, під час якого за будь-які рівні проміжки часу швидкість тіла змінюється на одну й ту саму величину, називають прямолінійним рівноприскореним рухом.
- Прискоренням  $\vec{a}$  називають векторну величину, що дорівнює відношенню зміни швидкості тіла  $\vec{v} - \vec{v}_0$  до проміжку часу  $t$ , за який ця зміна відбулася:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ .
- Падіння в умовах, коли опором повітря можна знехтувати, називають вільним падінням. Усі тіла, що вільно падають, рухаються з прискоренням  $g = 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ . Його називають прискоренням вільного падіння. Розв'язуючи задачі, часто приймають  $g = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .
- За умови прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості:
  - швидкість  $\vec{v} = \vec{a}t$ ,
  - проекція швидкості  $v_x = a_x t$ ,
  - проекція переміщення  $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$ .
- За умови прямолінійного рівноприскореного руху з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ :
  - швидкість  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ ,
  - проекція швидкості  $v_x = v_{0x} + a_x t$ ,
  - проекція переміщення.
- За умови рівномірного руху тіла по колу модуль швидкості залишається незмінним, а напрям швидкості змінюється: у будь-якій точці траєкторії швидкість напрямлена по дотичній до кола в цій точці.
- Проміжок часу, протягом якого тіло, що рівномірно рухається по колу, робить один повний оберт, називають періодом обертання і позначають  $T$ . Число повних обертів за одну секунду називають обертовою частотою і позначають  $n$ . Період і частота є взаємооберненими величинами:  $T = \frac{1}{n}$ , а  $n = \frac{1}{T}$ .

- За умови рівномірного руху по колу модуль швидкості тіла  $v$ , радіус кола  $R$  та період обертання  $T$  пов'язані співвідношенням  $v = \frac{2\pi R}{T}$ .
- За умови рівномірного руху по колу прискорення тіла напрямлене по радіусу до центра кола. Модуль прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , де  $v$  — модуль швидкості тіла,  $R$  — радіус кола, по якому рухається тіло.

# 2 ДИНАМІКА

---

- § 6. Закон інерції — перший закон Ньютона
- § 7. Взаємодії та сили
- § 8. Другий закон Ньютона
- § 9. Третій закон Ньютона
- § 10. Закон всесвітнього тяжіння
- § 11. Сили тертя
- § 12. Рух і рівновага тіла під дією декількох сил
- § 13. Імпульс. Закон збереження імпульсу
- § 14. Механічна робота. Потужність
- § 15. Енергія

## § 6. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ — ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

---

1. Коли швидкість тіла змінюється?
2. Закон інерції
3. Інерціальні системи відліку та перший закон Ньютона
4. Застосування явища інерції
5. Чи очевидний перший закон Ньютона?

### 1. КОЛИ ШВИДКІСТЬ ТІЛА ЗМІНЮЄТЬСЯ?



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

---

Ударте ключкою шайбу, що лежить на льоду, і вона почне рухатися (рис. 6.1). Отже, дія ключки на шайбу *змінила швидкість* шайби.



Рис. 6.1

А якщо вдарити по шайбі, що рухається? І в цьому випадку її *швидкість зміниться*: ударом можна зупинити шайбу або надати їй швидкості в іншому напрямі.

---

Цей та інші подібні досліди і спостереження, з якими знайомий кожен із нас, показують, що *внаслідок дії на тіло інших тіл його швидкість змінюється*.

Але чи завжди це так? Чи може швидкість тіла *змінюватися*, хоча на нього *не діють* інші тіла?



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

---

Простежимо за рухом шайби по льоду після удару ключкою. Ми помітимо, що швидкість шайби *зменшується*. Це зменшення швидкості під час руху шайби набагато помітніше, якщо вона ковзатиме не по льоду, а по асфальту.

---

Яке ж тіло діє на шайбу, що ковзає, зменшуючи її швидкість? Адже ми не бачимо, щоб її щось тягнуло чи штовхало. Може, шайба гальмується «сама собою»? Але якщо це гальмування — властивість самої шайби, то чому на асфальті вона «гальмується» набагато сильніше, ніж на льоду?

Ви, певна річ, здогадалися: причиною зменшення швидкості шайби є *тертя*. Під час ковзання шайби по асфальту тертя набагато більше, ніж під час ковзання по льоду, ось чому після того самого удару шайба, рухаючись по асфальту, зупиняється набагато раніше, ніж коли вона рухається по льоду.

Першим, хто зрозумів, що швидкість тіла зменшується не «сама по собі», а внаслідок тертя, був Г. Галілей.

А ось інший приклад.



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

---

Підніміть м'яч і відпустіть його. Він почне падати. Під час падіння, як ми вже знаємо, швидкість тіла *збільшується*.

---

Яке ж тіло діє на падаючий м'яч, прискорюючи його? Хіба ми бачимо, що його під час падіння щось тягне або штовхає?

Цим «невидимим» тілом, що діє на м'яч, є величезна Земля. Як не дивно, довгий час її не помічали саме через її величезність (згадаймо приказку «Усе велике бачиться здалеку»). Земля *притягує* м'яч.

Першим, хто зрозумів, що прискорення падаючих тіл зумовлене притяганням Землі, був І. Ньютон. Про це ми докладніше розповімо в § 10. *Закон всесвітнього тяжіння*.

Але внаслідок притягання Землі швидкість тіла не обов'язково збільшується!



## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

---

Киньте м'яч вертикально вгору. Під час піднімання м'яча його швидкість *зменшується*.

---

Це зменшення швидкості також зумовлене притяганням м'яча Землею.

Отже, на підставі наших дослідів і спостережень ми можемо припустити, що

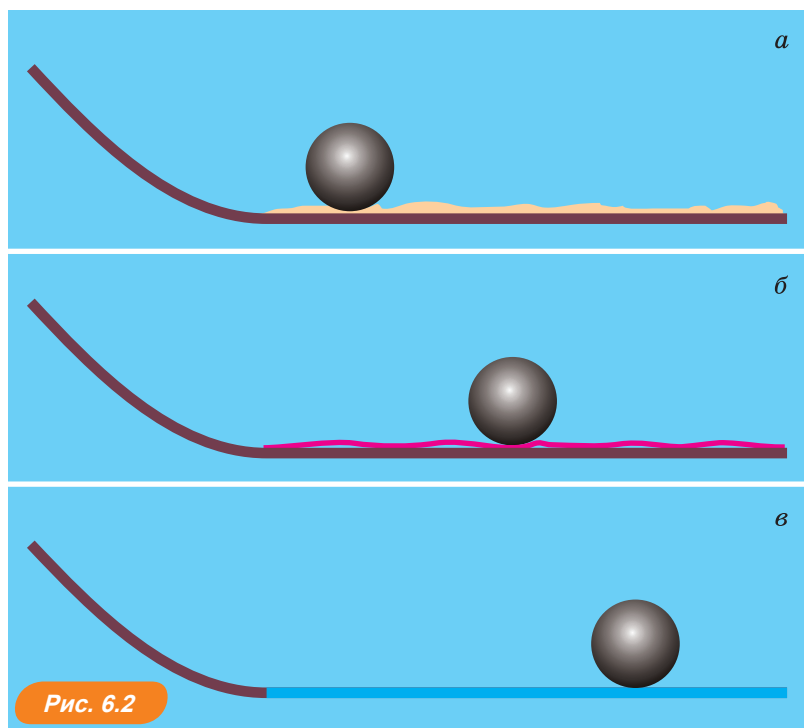
швидкість тіла змінюється внаслідок дії на нього інших тіл.

## 2. ЗАКОН ІНЕРЦІЇ

Те, що швидкість тіла змінюється *тільки* внаслідок дії на це тіло інших тіл, першим припустив Галілей.

Галілей був першим серед учених, хто почав перевіряти свої припущення *на досліді*. Він скочував кулі з похилої площини (з тієї самої висоти) і спостерігав за їхнім подальшим рухом по *горизонтальній* поверхні. Учений помітив: що більш тверда й гладка ця поверхня, то *довше* котиться по ній куля.

Так, по посипаній піском поверхні куля прокотиться зовсім небагато (рис. 6.2, а), по тканині прокотиться набагато довше (рис. 6.2, б), а по гладкому склу котитиметься дуже довго (рис. 6.2, в). Але зрештою вона все-таки зупиниться.





На підставі своїх дослідів Галілей здогадався, що причиною зменшення швидкості кулі є *тертя*. Під час руху кулі по тканині тертя менше, ніж під час руху по піску, а під час руху по склу — ще менше. Але все-таки й у цьому випадку тертя є. Може, тільки тому куля зрештою й зупиняється?

І Галілей висловив геніальний здогад: він припустив, що якби тертя не було *зовсім*, куля котилася б з незмінною швидкістю *вічно!* Так було відкрито перший закон механіки. Його формулюють як

**закон інерції:** якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається прямолінійно рівномірно або зберігає стан спокою.

Тіло рухається з постійною (за модулем і напрямом) швидкістю й у тому разі, коли дії інших тіл, що діють на дане тіло, *скомпенсовані*. Приблизно так і відбувається з кулею, що котиться по склу: тертя при цьому дуже мале, а притягання кулі Землею компенсується тим, що скло тисне на кулю знизу вгору.

Те, що тіло *зберігає* свою швидкість, якщо на нього не діють інші тіла (або дії цих тіл скомпенсовані), називають *явищем інерції*. Про різноманітні застосування цього явища ми розповімо далі.

### 3. ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ТА ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Розпочате Г. Галілеєм у 16-му столітті відкриття законів механіки завершив у 17-му столітті І. Ньютон. Він сформулював систему основних законів механіки, яку згодом назвали «трьома законами Ньютона».

*Першим* з цих законів Ньютон узяв відкритий Галілеєм закон інерції<sup>1</sup>. Тому закон інерції називають також *першим законом Ньютона*.

Сучасне формулювання першого закону Ньютона ми наведемо трохи пізніше. У ньому враховується, що *закон інерції виконується не в усіх системах відліку*.

Наприклад, дослід показує, що він досить точно виконується в системі відліку, пов'язаній із Землею. А от, наприклад, у системі відліку, пов'язаній з автобусом, що їде міською вулицею, закон інерції не виконується: коли автобус ру-

<sup>1</sup> Ньютон визнавав за Галілеєм честь відкриття цього закону: він говорив про себе, що «стояв на плечах гігантів», одним з яких був Галілей.

шає з місця, пасажирів «кидає» назад, а коли автобус гальмує, пасажирів «кидає» уперед.

Системи відліку, у яких виконується закон інерції, називають *інерціальними*.

Те, що закон інерції досить точно виконується в системі відліку, пов'язаній із Землею, означає, що

пов'язану із Землею систему відліку досить точно можна вважати інерціальною системою відліку.

У наведеному далі формулюванні першого закону Ньютона зазначено, у яких системах відліку він справедливий.

*Перший закон Ньютона:* існують системи відліку, що називають інерціальними, у яких тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.

#### 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА ІНЕРЦІЇ

Перший закон Ньютона ми застосовуємо дуже часто. Наприклад, його застосовує кожен, хто кидає м'яч або розбігається для стрибка. І в тому, і в іншому випадку використовують *явище інерції* — те, що тіло зберігає швидкість і рухається «само собою».

Використовує перший закон Ньютона і велосипедист, який, розігнавшись на рівному шосе, насолоджується якийсь час швидким рухом, не крутячи педалі.

Особливо ефектно використовують перший закон Ньютона в зимових видах спорту, де тертя вдається зробити особливо малим (рис. 6.3).

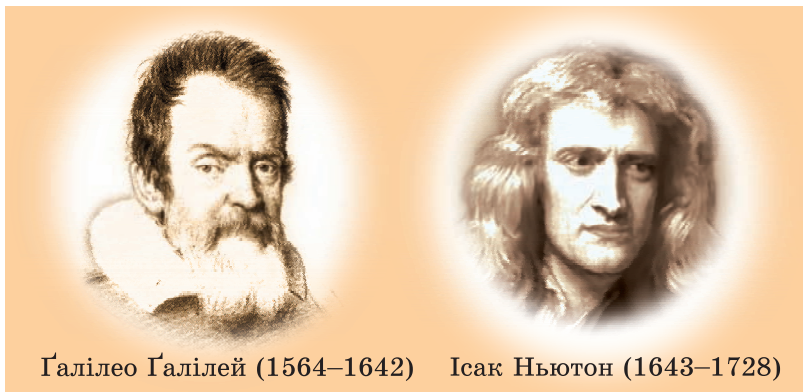
Однак перший закон Ньютона може бути і небезпечним, якщо його не враховувати. Наприклад, не можна різко гальмувати переднім гальмом, коли ви швидко їдете на велосипеді: «зберігаючи швидкість», ви можете вилетіти із сідла й перелетіти через руль!



Рис. 6.3

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Закон інерції (перший закон Ньютона) здається дуже простим. Але чому ж тоді його не відкрив давньогрецький учений Арістотель, який почав вивчати рух тіл за дві тисячі років до Галілея?



Галілео Галілей (1564–1642)    Ісаак Ньютон (1643–1728)

Арістотель стверджував: щоб тіло рухалося, його необхідно «рухати». І *спостереження* дійсно вказують скоріше на те, що тіла «самі собою» не рухаються. Наприклад, коли кінь перестає тягти візок, візок зупиняється; коли стихає вітер, листя на деревах завмирає. Тому справедливість учення Арістотеля не викликала сумнівів дві тисячі років.

Галілей зробив принципово новий крок у вивченні руху: він перейшов від спостережень до *дослідів*. У цих дослідах він установив, що рух припиняється через цілком визначену причину — *через тертя*. І здогадався, що якби тертя можна було усунути зовсім, то тіло рухалося б «саме собою» вічно! Це й було відкриттям закону інерції.

Однак відкриття закону інерції зовсім не зробило його очевидним: з ним і сьогодні не погоджується здоровий глузд. І причина та ж сама, що заважала Арістотелю відкрити цей закон: ми *бачимо*, що тіла навколо нас не рухаються самі собою як завгодно довго! Як же не вірити власним очам?

Але річ у тім, що будь-який рух у «земному» світі, що оточує нас, супроводжується тертям — ми так само не помічаємо його, як не помічав колись і Арістотель.

Однак ми вже знаємо, що внаслідок тертя рух не зникає, а переходить з однієї форми в іншу: тіла нагріваються, тобто

збільшується швидкість хаотичного руху частинок, з яких складаються ці тіла.

Сьогодні, коли люди навчилися значно зменшувати тертя, здатність тіл зберігати рух уже не здається такою надзвичайною.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Швидкість тіла змінюється тільки внаслідок дії на нього інших тіл.
- Закон інерції: якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається прямолінійно рівномірно або зберігає стан спокою.
- Системи відліку, у яких виконується закон інерції, називають інерціальними. Систему відліку, пов'язану із Землею, досить точно можна вважати інерціальною системою відліку.
- Перший закон Ньютона: існують системи відліку, що називають інерціальними, у яких тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл скомпенсовані.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Коли швидкість тіла змінюється?
2. Чи може швидкість тіла змінитися, якщо на нього не діють інші тіла?
3. Чи може швидкість тіла залишатися незмінною, хоча на нього діють інші тіла? Підтвердьте свою відповідь прикладом.
4. Сформулюйте закон інерції. Хто його відкрив?
5. У чому полягає явище інерції? Наведіть приклади цього явища.
6. Чому, коли струшувати мокру парасольку, з неї злітають краплі води?
7. Які системи відліку називають інерціальними?
8. Чи можна пов'язану із Землею систему відліку приблизно вважати інерціальною?
9. Сформулюйте перший закон Ньютона.
10. Наведіть приклади прояву і застосування першого закону Ньютона.
11. Чому небезпечно різко гальмувати переднім гальмом, коли ви швидко їдете на велосипеді?

## § 7. ВЗАЄМОДІЇ ТА СИЛИ

---

1. Сили в механіці
2. Чим характеризується кожна сила?
3. Приклади дії сил
4. Вимірювання сил
5. Додавання сил

### 1. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

Дії тіл одне на одне називають *взаємодією*. Взаємодію тіл описують за допомогою *сил*. Кожна сила характеризується числовим значенням і напрямом, тобто є *векторною* величиною. Отже,

сила — векторна величина, що є мірою дії одного тіла на інше.

Як показує дослід,

усі механічні явища зумовлені дією трьох видів сил: *сил пружності*, *сил всесвітнього тяжіння* і *сил тертя*.

З проявами цих сил ми вже ознайомилися коротко в попередньому параграфі. Нагадаймо про них.

1) Під час удару ключкою на шайбу з боку ключки діяла сила пружності.

*Сила пружності* виникає внаслідок деформації тіла, тобто зміни його форми або розмірів.

І дійсно, під час удару ключка трохи зігнулася. Сили пружності зумовлені взаємодією між частинками zdeформованого тіла.

2) На тіло, що падає, діє сила притягання з боку Землі.

Силу, з якою Земля притягує тіло, називають *силою тяжіння*. Сила тяжіння є проявом сил *всесвітнього тяжіння*.

Точку прикладання сили тяжіння називають *центром тяжіння* тіла.

Як ми невдовзі побачимо, сила тяжіння діє не тільки на тіла, що падають.

З) Під час ковзання шайби по льоду на неї діяла сила тертя з боку льоду.

*Сили тертя ковзання діють між тілами, що стикаються, рухаючись одне відносно одного.*

Сили тертя ковзання зумовлені чіплянням нерівностей на поверхнях тіл, що стикаються.

### **ЧИ МОЖУТЬ СИЛИ ВРІВНОВАЖУВАТИ ОДНА ОДНУ?**

Як ми бачили на попередніх прикладах, якщо швидкість тіла змінюється, це означає, що на нього діє сила.

А чи правильне протилежне твердження? Коли швидкість тіла не змінюється (наприклад, книга лежить на столі), чи означає це, що на тіло не діють жодні сили?

Ні, це не завжди так! Наприклад, якщо книга лежить на столі, то на неї діють сила тяжіння та сила пружності з боку стола. А книга залишається у спокої тому, що сила тяжіння і сила пружності *врівноважують* одна одну. Отже,

сили можуть урівноважувати одна одну.

## **2. ЧИМ ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ КОЖНА СИЛА?**

На попередніх прикладах ми бачили, що

будь-яка сила прикладена до тіла з боку якогось *іншого* тіла.

Це означає, що в розповіді про будь-яку силу має бути *дві* «дійові особи»: тіло, *до якого* прикладено цю силу, і тіло, *з боку якого* прикладено цю силу.

Крім того,

кожна сила характеризується: 1) числовим значенням (модулем); 2) напрямом; 3) точкою прикладання.

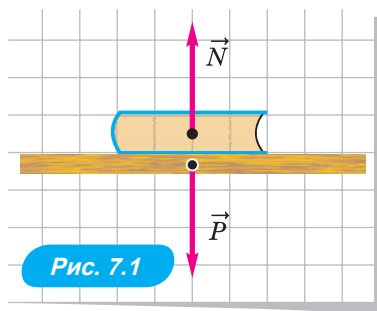
На рисунках сили, як і решту векторних величин, позначають стрілками. Початок стрілки збігається з точкою прикладання сили, напрям стрілки показує напрям сили, а довжина стрілки пропорційна модулю сили. Якщо тіло можна вважати матеріальною точкою, то точки прикладання всіх сил, що діють на тіло, можна розмістити на рисунку в одній точці. У наступному розділі ми розглянемо кілька прикладів.

**Одиницю сили** на честь Ньютона називають *ньютон* (Н). З означенням цієї одиниці сили ми ознайомимося трохи пізніше (див. § 8. *Другий закон Ньютона*), а зараз зауважимо тільки, що 1 Н — невелика сила. Так, коли ви тримаєте на

долоні літровий пакет молока або соку, цей пакет тисне на долоню із силою, що дорівнює приблизно 10 Н.

### 3. ПРИКЛАДИ ДІЇ СИЛ

На рисунку 7.1 зображено сили пружності, з якими діють одне на одного стіл і книга, що лежить на ньому.



Силу, з якою книга тисне на стіл, називають *вагою* книги.

*Вагою* тіла називають силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс.

Вагу зазвичай позначають  $\vec{P}$ . Зауважимо, що

вага тіла в спокої дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.

Ми доведемо це в § 9. *Третій закон Ньютона.*

Проте вага і сила тяжіння — це *різні* сили: вага тіла діє на опору (або підвіс) з боку тіла, а сила тяжіння діє на саме тіло з боку Землі. Природа цих сил також різна.

Силу, з якою стіл тисне на книгу знизу вгору, називають *силою нормальної реакції* і позначають  $\vec{N}$ . Така назва пояснюється тим, що ця сила напрямлена перпендикулярно до поверхні стола, а перпендикуляр іноді називають *нормаллю*.

Наприклад, на рисунку 7.2 зображено сили, що діють на книгу, яка лежить на столі. Це сила тяжіння  $\vec{F}_T$ , яка діє з боку Землі, та сила нормальної реакції  $\vec{N}$ . Книга перебуває у спокої, адже ці сили врівноважують<sup>1</sup> одна одну.

<sup>1</sup> Якщо сили, що діють на тіло, урівноважують одна одну, кажуть також, що дії цих сил скомпенсовані.

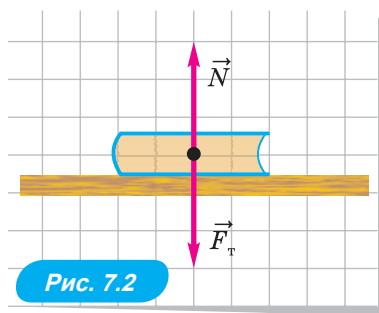


Рис. 7.2

Якщо дві сили врівноважують одна одну, то вони рівні за модулем і напрямлені протилежно.

#### 4. ВИМІРЮВАННЯ СИЛ

Ви вже знаєте, що сила пружності зумовлена деформацією тіла. При цьому чим більша деформація, тим більшою є сила пружності. Отже,

з деформації тіла можна судити про значення сили пружності.

Для вимірювання сил на практиці використовують властивість сили пружності, відкриту в 17-му столітті англійським фізиком Р. Гуком.

**Закон Гука.** Підвішуючи до пружини різну кількість однакових вантажів (рис. 7.3), Гук установив на досліді, що

модуль сили пружності  $F_{\text{пр}}$  прямо пропорційний видовженню пружини  $x$ . Співвідношення між модулем сили пружності та модулем видовження пружини можна записати у вигляді

$$F_{\text{пр}} = k |x|.$$

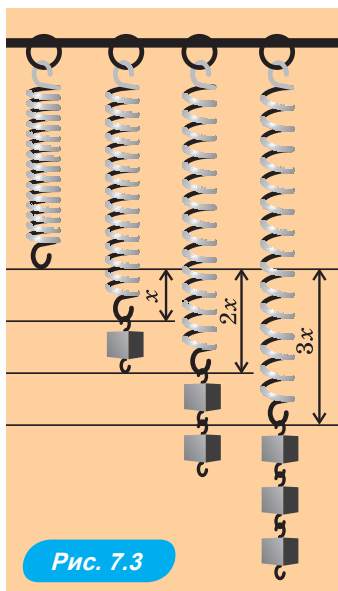


Рис. 7.3

Закон Гука іноді записують у вигляді  $F_{\text{пр}} = -kx$ . При цьому мають на увазі *проекцію* сили пружності на вісь  $x$ .



Коефіцієнт пропорційності  $k$  називають *жорсткістю пружини*. Як видно з наведеної формули, одиницею жорсткості є  $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Прилад для вимірювання сили за допомогою деформації пружини називають *пружинним динамометром*. На рисунку 7.4, *а* зображено шкільний динамометр, а на рисунку 7.4, *б* — його будову.

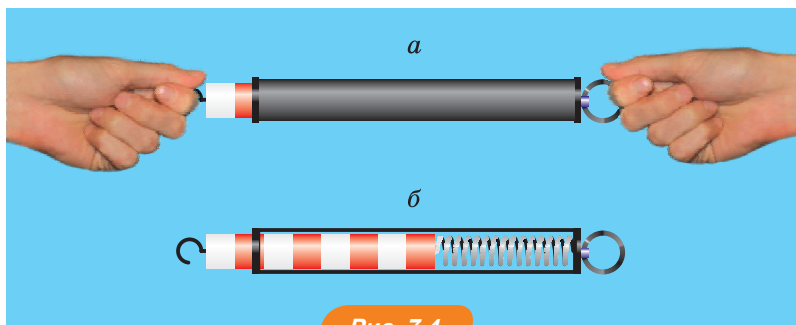


Рис. 7.4

## 5. ДОДАВАННЯ СИЛ

Досліди свідчать, що коли тіло можна розглядати як матеріальну точку, дію на тіло декількох сил можна замінити дією *однієї* сили.

Силу, що діє на тіло так само, як декілька одночасно прикладених до цього тіла сил, називають *рівнодійною* цих сил. Знаходження рівнодійної декількох сил називають *додаванням* цих сил.

Оскільки сили є векторними величинами, їх додають за правилом додавання векторів.

Якщо дві сили напрямлені *однаково*, їх рівнодійна напрямлена так само, а модуль рівнодійної дорівнює сумі модулів сил-доданків. На рисунку 7.5, *а* наведено приклад додавання

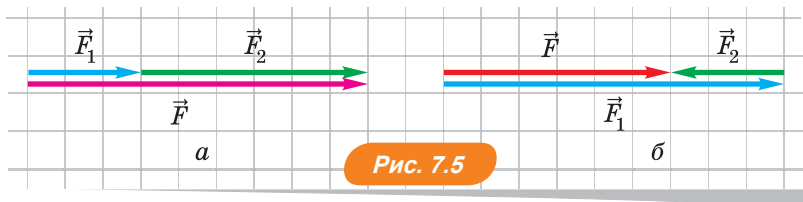
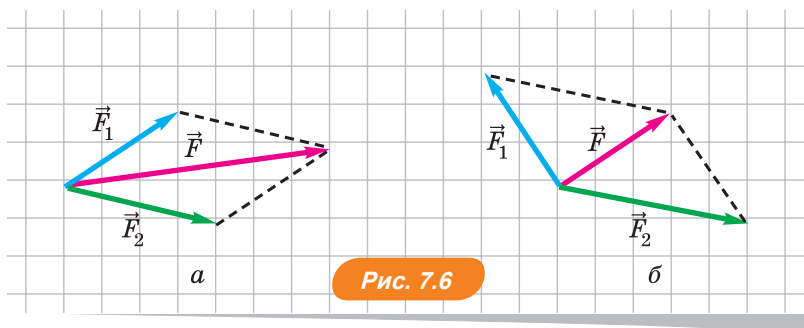


Рис. 7.5

таких сил. Сили-доданки позначено синьою та зеленою стрілками, а їх рівнодійну  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  — червоною стрілкою.

Якщо дві не рівні за модулем сили напрямлені *протилежно*, їх рівнодійна напрямлена в бік більшої сили, а модуль рівнодійної дорівнює різниці модулів сил-доданків. На рисунку 7.5, б наведено приклад додавання таких сил. Позначення ті ж самі, що на попередньому рисунку.

Якщо сили напрямлені *під кутом одна до одної*, то їх рівнодійну визначають, використовуючи додавання векторів за «правилом паралелограма», наведеним на рисунку 7.6. У цьому випадку початки двох векторів-доданків сполучають і будують паралелограм, суміжними сторонами якого є вектори-доданки. Рівнодійна  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  є вектором, що збігається з діагоналлю побудованого паралелограма, причому початок цього вектора збігається зі спільним початком векторів-доданків.



На рисунку 7.6, а наведено приклад додавання сил, коли кут між силами-доданками гострий, а на рисунку 7.6, б — коли цей кут тупий.

Як ми вже знаємо,

якщо рівнодійна двох сил дорівнює нулю, то ці сили рівні за модулем і напрямлені протилежно.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Сила — векторна величина, що є мірою дії одного тіла на інше.
- Усі механічні явища зумовлені дією трьох видів сил: сил пружності, сил тяжіння та сил тертя.
- Сила пружності виникає внаслідок деформації тіла, тобто зміни його форми або розмірів.

- Силу, з якою Земля притягає тіло, називають силою тяжіння. Сила тяжіння є проявом сил всесвітнього тяжіння.
- Сили тертя ковзання діють між тілами, що стикаються, рухаючись одне відносно одного.
- Будь-яку силу прикладено до тіла з боку іншого тіла. Кожна сила характеризується: 1) числовим значенням (модулем); 2) напрямом; 3) точкою прикладання.
- Вагою тіла називають силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс. Вага тіла у спокої дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло.
- Силу, з якою опора тисне на тіло, називають силою нормальної реакції. Вона напрямлена перпендикулярно поверхні опори.
- Якщо дві сили врівноважують одна одну, то вони рівні за модулем і напрямлені протилежно.
- Закон Гука: модуль сили пружності  $F_{\text{пр}}$  прямо пропорційний видовженню пружини  $x$ . Закон Гука можна записати у вигляді:  $F_{\text{пр}} = k |x|$ .
- Силу, що діє на тіло так само, як декілька одночасно прикладених до цього тіла сил, називають рівнодійною цих сил.
- Знаходження рівнодійної декількох сил називають додаванням цих сил. Сили додають за правилом додавання векторів.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Дією яких трьох видів сил зумовлені механічні явища?
2. Наведіть приклад дії сили пружності.
3. Яку силу називають силою тяжіння?
4. Наведіть приклад дії сили тяжіння.
5. Наведіть приклад дії сили тертя ковзання.
6. Що можна сказати про модулі та напрями двох сил, які врівноважують одна одну?
7. Чим характеризується кожна сила?
8. Наведіть приклад сил, з якими два тіла діють одне на одне.
9. Що таке вага тіла? Як вона пов'язана із силою тяжіння?
10. Що таке сила нормальної реакції?
11. Сформулюйте закон Гука.
12. За умови однакового видовження двох пружин з боку першої пружини діє сила пружності 2 Н, а з боку другої — 6 Н. Жорсткість якої пружини більша? У скільки разів?
13. Видовження першої пружини дорівнює 2 см, а видовження другої — 6 см. При цьому з боку цих пружин діють однакові сили пружності. Жорсткість якої пружини більша? У скільки разів?

14. Унаслідок розтягування пружини на 5 см виникає сила пружності 10 Н. Чому дорівнює жорсткість цієї пружини?
15. Що називають рівнодійною декількох сил?
16. Дві сили напрямлені однаково. Перша сила дорівнює 5 Н, а рівнодійна двох сил 7 Н. Чому дорівнює модуль другої сили?

### Другий рівень

17. Чи однаковий напрям сили тяжіння для всіх жителів Харкова? для всіх жителів Землі?
18. Що спільного у ваги і сили тяжіння і чим вони відрізняються?
19. Під час розтягування першої пружини на 10 см виникає сила пружності 100 Н, а під час розтягування другої пружини на 5 см виникає сила пружності 20 Н. Жорсткість якої пружини більша і в скільки разів?
20. Коли довжина пружини 14 см, сила пружності дорівнює 20 Н, а коли довжина пружини 18 см, сила пружності дорівнює 60 Н. Яка довжина недеформованої пружини? Чому дорівнює жорсткість пружини?
21. Модуль рівнодійної двох сил, що діють вздовж однієї прямої, дорівнює 5 Н. Модуль першої сили дорівнює 3 Н. Якою може бути модуль другої сили?
22. Дві сили напрямлені перпендикулярно одна одній. Модуль першої сили 3 Н, а модуль другої сили 4 Н. Чому дорівнює модуль рівнодійної цих сил?
23. Складіть задачу за темою «Взаємодії та сили», відповіддю якої було б «Напрявлені протилежно».

## § 8. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Співвідношення між силою та прискоренням
2. Маса
3. Другий закон Ньютона
4. Рух тіла під дією сили тяжіння
5. Чи очевидний другий закон Ньютона?

### 1. СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ СИЛОЮ ТА ПРИСКОРЕННЯМ



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІДИ

Вивчимо на досліді, як рухається тіло, якщо на нього діє тільки *одна постійна сила*, а дії інших сил скомпенсовані. Для наших дослідів скористаємося візком, що може котитися по столу практично без тертя<sup>1</sup>.

З'ясуємо, як рухається візок під дією прикладеної до нього горизонтальної сили. Для вимірювання цієї сили зручно закріпити динамометр на самому візку (рис. 8.1). З'єднаємо ниткою візок і вантаж, а потім перекинемо нитку через блок.

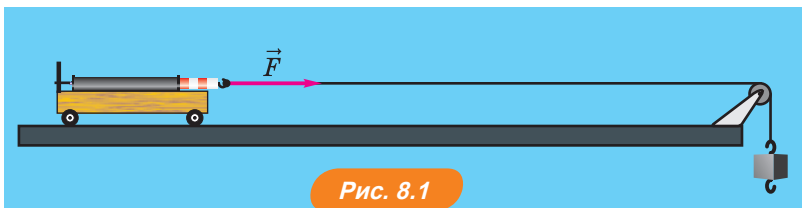


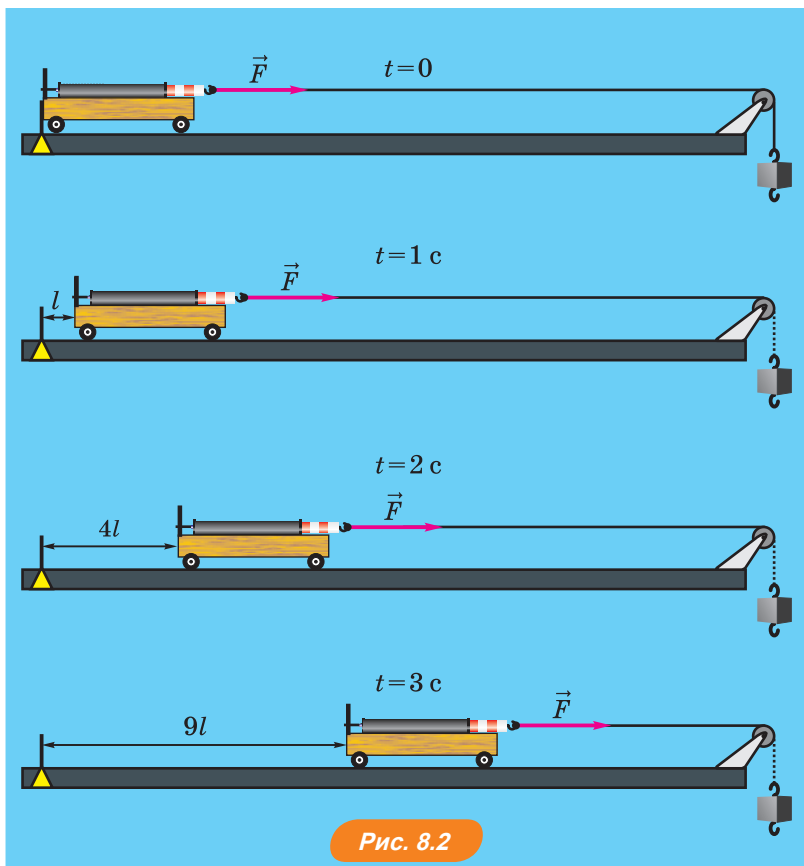
Рис. 8.1

Візок почне котитися по столу, і його швидкість збільшуватиметься. З показів динамометра можна зробити висновок, що на візок під час руху діє *постійна сила*.

Вимірюючи шляхи, які проходить візок за різні проміжки часу, можна помітити, що шлях пропорційний *квадрату* часу руху (рис. 8.2; на всіх рисунках, крім першого, вантаж розташова-

<sup>1</sup> Для демонстрації подібних дослідів розроблено спеціальний прилад, у якому візок рухається на «повітряній подушці» — у цьому випадку тертя особливо мале.

ний нижче від зображеного положення, тому нитку позначено пунктиром). А це означає (див. § 4. Шлях за умови прямолінійного рівноприскореного руху), що візок рухається *рівноприскорено*.



Отже, цей та інші подібні досліди показують, що

під дією постійної сили тіло рухається з постійним прискоренням.

З'ясуємо тепер, як пов'язані модуль прискорення тіла і модуль сили, що діє на тіло.

Змінювати силу, що діє на візок, можна, підвишуючи до нитки різні вантажі. Вимірюють модуль цієї сили за показами динамометра.

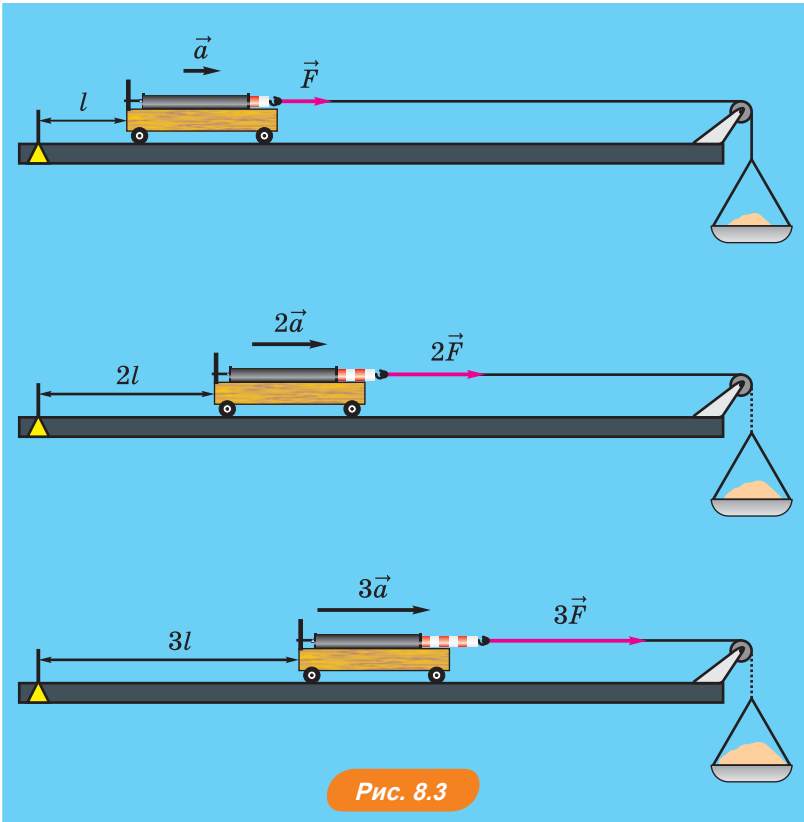


Рис. 8.3

Із формули  $l = \frac{at^2}{2}$  випливає, що шлях, пройдений візком за той самий проміжок часу, пропорційний прискоренню візка. Виміри показують, що цей шлях пропорційний силі, яка діє на візок (рис. 8.3; на всіх рисунках, крім першого, вантаж розташований нижче від зображеного положення, тому нитку позначено пунктиром). А це означає, що

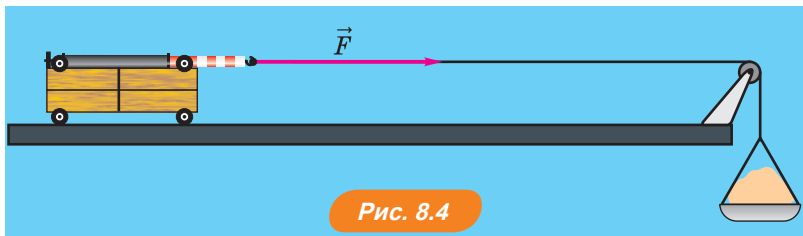
модуль прискорення тіла пропорційний модулю сили, яка діє на це тіло.

Наші досліді показують також, що

напрямок прискорення тіла збігається з напрямом сили, яка діє на тіло.

## 2. МАСА

Повторивши описані досліди з двома однаковими візками, з'єднаними так, як зображено на рисунку 8.4, ми побачимо: щоб надати *двома* візкам такого самого прискорення, що й одному, до них треба прикласти вдвічі більшу силу.



Співвідношення між прикладеною до тіла силою і прискоренням тіла під дією цієї сили характеризують *інертністю* тіла. Чим більшу силу треба прикласти до тіла, щоб надати йому даного прискорення, тим більша інертність цього тіла. Наприклад, ми бачили, що інертність двох візків удвічі більша, ніж інертність одного візка.

Мірою інертності тіла є *маса*.

Щоб надати тілу даного прискорення, до тіла слід прикласти силу, пропорційну його масі.

*Одиницею маси* в SI є кілограм (кг). Це маса еталона (зразка), яким служить циліндр, що зроблений зі спеціального сплаву і зберігається в Міжнародному бюро мір і ваги у Франції. Приблизно можна вважати, що 1 кг дорівнює масі 1 л прісної води<sup>1</sup>.

Використовують також частинні та кратні одиниці маси: 1 грам (г), що дорівнює 0,001 кг, а також 1 тону (т), що дорівнює 1000 кг.

Зверніть увагу: *інертність* — це властивість *тіла*! Не плутайте інертність з уже знайомим нам *явищем інерції*, яке полягає в тому, що тіло зберігає свою швидкість незмінною, якщо на нього не діють інші тіла (або дії інших тіл скомпенсовані).

Інертність мають усі тіла, та особливо наочно властивість інертності виявляється у масивних тіл. Покажемо це на ефектному досліді.

<sup>1</sup> Через те й було вибрано таку одиницю маси: її легко відтворити з точністю, достатньою для багатьох випадків.





## ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Підвісимо масивну кулю на нитці, а знизу до кулі прикріпимо таку саму нитку (рис. 8.5).

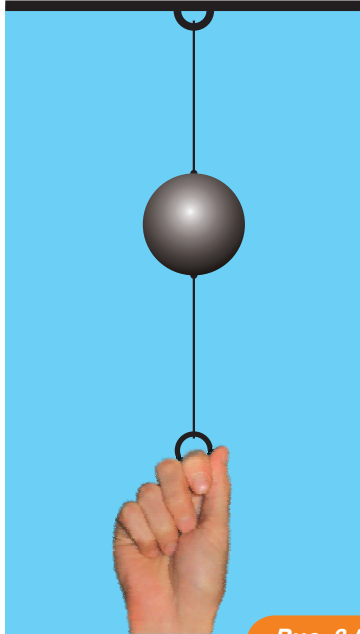


Рис. 8.5

Якщо потягнути за нижню нитку *плавно*, то розірветься *верхня* нитка. Цього можна було очікувати: адже верхня нитка розтягнута ще й вагою кулі. Але якщо *різко смикнути* нижню нитку, то розірветься не верхня, а *нижня* нитка!

Річ у тім, що під час різкого ривка *масивна* куля через інертність не встигне зрушитися настільки, щоб помітно розтягнути верхню нитку.

А от інший схожий дослід. На двох нитках підвішують дерев'яну паличку (можна взяти олівець). Якщо плавно натиснути рукою на паличку, то одна з ниток розірветься. Але якщо *різко вдарити* по середині палички металевим стержнем, то паличка зламається, а обидві нитки *залишаться цілими*! Річ у тім, що за короткий час удару паличка, що має інертність, не встигає зміститися так, щоб помітно розтягнути нитки.

## ЯК ПОРІВНЯТИ МАСИ ДВОХ ТІЛ?

Досліди показують, що маси  $m_1$  і  $m_2$  двох тіл можна *порівнювати*, порівнюючи прискорення цих тіл під час взаємодії між ними.

Відношення мас двох тіл обернено пропорційне відношенню прискорень цих тіл під час їх взаємодії:  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ .

Але якщо маси двох тіл під час їх взаємодії можна порівнювати, то масу будь-якого тіла можна й *виміряти*, порівнявши його масу з масою еталона (або його копії) — масою 1 кг. На практиці, однак, масу тіла виміряють набагато простіше — за допомогою *зважування*. Про це ми розповімо далі.

## 3. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

З викладеного можна зробити висновок, що *сила дорівнює добутку маси тіла на прискорення, яке надається цією силою*. Якщо на тіло діє кілька сил, то прискорення тілу надає *рівнодійна* цих сил. Позначимо цю рівнодійну  $\vec{F}$ .

Співвідношення між рівнодійною, масою тіла та його прискоренням формулюють як

*другий закон Ньютона*: рівнодійна всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:

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

*Другий закон Ньютона справедливий тільки в інерціальних системах відліку*, адже тільки в цих системах відліку прискорення тіла зумовлене силами, що діють на нього.

Використовуючи другий закон Ньютона, можна знайти прискорення  $\vec{a}$  тіла, якщо відома маса  $m$  тіла і рівнодійна  $\vec{F}$  всіх сил, що діють на це тіло. Для цього другий закон Ньютона записують у вигляді

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

Такий запис означає, що модуль прискорення тіла  $a = \frac{F}{m}$ , а напрям прискорення збігається з напрямом сили.

Як ми вже говорили, одиницю сили «ньютон» (Н) визначають за допомогою другого закону Ньютона. А саме:

1 Н дорівнює силі, яка тілу масою 1 кг надає прискорення  $1 \text{ м/с}^2$ . Отже,  $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$ .

#### 4. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Розглянемо рух тіла під дією однієї сили. Для тіла, що перебуває поблизу поверхні Землі, такою *єдиною* силою може бути тільки *сила тяжіння*, адже вона діє на *всі* тіла.

##### ЧОМУ ДОРІВНЮЄ СИЛА ТЯЖІННЯ?

Як ви вже знаєте, досліди показують, що під час вільного падіння всі тіла поблизу поверхні Землі рухаються з *однаковим* прискоренням, яке називають *прискоренням вільного падіння*  $\vec{g}$ .

Це прискорення зумовлене дією на тіло сили тяжіння  $\vec{F}_T$ . Таким чином, другий закон Ньютона для тіла, що вільно падає, має вигляд:

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

Отже,

сила тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ , де  $m$  — маса тіла.

Завдяки тому, що сила тяжіння пропорційна масі тіла (рис. 8.6), можна вимірювати масу тіла за допомогою *зважування*. Адже, зважуючи тіло в стані спокою, ми вимірюємо силу тяжіння, що діє на нього, тому що для тіла в стані спокою вага дорівнює силі тяжіння.

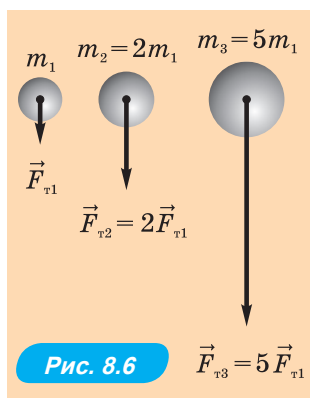


Рис. 8.6

##### ЧИ ПОВ'ЯЗАНИЙ НАПРЯМ ШВИДКОСТІ ТІЛА З НАПРЯМОМ СИЛИ, ЩО ДІЄ НА НЬОГО?

Для тіла, що падає зі стану спокою, напрям швидкості *збігається* з напрямом сили тяжіння (рис. 8.7, а). При цьому швидкість *збільшується* з часом; залежність модуля швидкості від часу виражається формулою  $v = gt$ .

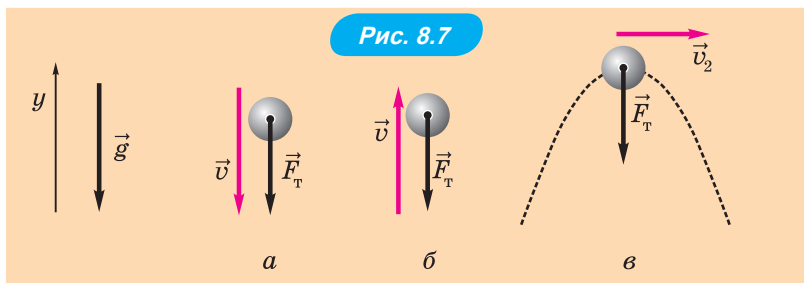


Рис. 8.7

Якщо тіло кинуте вертикально вгору, то під час руху вгору швидкість тіла напрямлена протилежно силі тяжіння (рис. 8.7, б). Тому й прискорення тіла теж напрямлене протилежно швидкості. Отже, швидкість тіла *зменшуватиметься* з часом. Залежність проекції швидкості від часу за умови рівноприскореного руху завжди має вигляд  $v_y = v_{0y} + g_y t$ , де  $v_0$  — модуль початкової швидкості, а залежність модуля швидкості від часу в цьому випадку виражається формулою  $v = v_0 - gt$ , оскільки  $g_y = -g$  (рис. 8.7).

Якщо кинути тіло під деяким кутом, то і в цьому випадку прискорення тіла під час *усього* польоту напрямлене *вниз*, адже так напрямлена сила, що діє на тіло, — сила тяжіння. Однак тепер початкова швидкість тіла складає *кут* з напрямком сили. При цьому, як ми бачимо, тіло рухається по *криволінійній* траєкторії (рис. 8.7, в). Наприклад, у верхній точці траєкторії швидкість тіла напрямлена *перпендикулярно* силі. Під час руху поблизу цієї точки швидкість тіла змінюється в основному *за напрямом*.

Цей випадок особливо цікавий, адже сила притягання, що діє на планету з боку Сонця, напрямлена також *перпендикулярно* до швидкості планети (рис. 8.8). Ця сила викликає напрямлене до Сонця прискорення планети під час її руху по *коловій* орбіті. Можна сказати, що під час свого руху навколо Сонця планета ніби весь час перебуває у «верхній точці траєкторії»!

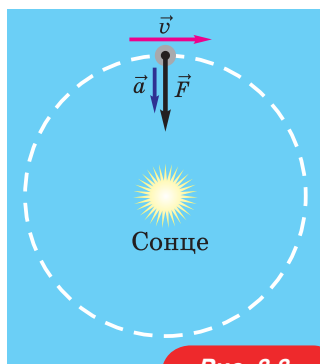


Рис. 8.8

Отже, з нашого розгляду випливає такий висновок:

швидкість тіла може бути напрямлена *під будь-яким кутом* до сили, що діє на тіло.

Якщо в заданій точці траєкторії напрям швидкості *збігається* з напрямом сили, то тіло рухається прямолінійно, причому швидкість тіла *збільшується*, а якщо напрям швидкості *протилежний* напрямку сили, то тіло рухається прямолінійно, причому швидкість тіла *зменшується*. Якщо ж швидкість напрямлена *під кутом* до напрямку сили, то траєкторія руху тіла *криволінійна*.

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Другий закон Ньютона так само не очевидний, як і перший: він теж начебто суперечить «здоровому глузду».

Заснований на спостереженнях «здоровий глузд» підказує нам, що швидкість тіла нібито завжди напрямлена так само, як і сила, що діє на це тіло. Але, розглядаючи рух тіла під дією сили тяжіння, ми переконалися, що це не завжди так: швидкість тіла може бути напрямлена *під будь-яким кутом* до сили, що діє на тіло. Через що ж виникає ця розбіжність «здорового глузду» з науковим розглядом?

Річ у тім, що на практиці ми часто стикаємося з випадками, коли початкова швидкість тіла дорівнює нулю. А в цих випадках, як ми вже знаємо, швидкість, якої набуває тіло внаслідок дії сили, справді напрямлена так само, як і ця сила.

Але якщо тіло має певну початкову швидкість (як, наприклад, тіло, кинуте вертикально вгору або під кутом до горизонту), то напрям швидкості вже не збігається з напрямом дії сили. І ми на добре знайомих прикладах переконалися, що це дійсно так.

Науковий підхід відрізняється від так званого «здорового глузду» тим, що він заснований не на випадкових спостереженнях, а на продуманих дослідах, у яких вивчають *усі* можливі варіанти перебігу природних явищ, а не тільки ті, що трапляються найчастіше.

Повертаючись до неочевидності другого закону Ньютона, звернемо увагу на те, що відповідно до цього закону сила, яка діє на тіло, визначає не швидкість цього тіла, а тільки *зміну швидкості* за найближчий малий проміжок часу. Тому швидкість тіла в цей момент залежить ще й від того, як напрямлена початкова швидкість тіла.

## ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Маса є мірою інертності тіла.
- Відношення мас двох тіл обернено пропорційне відношенню прискорень цих тіл під час їх взаємодії:  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ .
- Другий закон Ньютона: рівнодійна всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .
- Сила тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ , де  $m$  — маса тіла. Завдяки тому, що сила тяжіння пропорційна масі тіла, масу можна вимірювати зважуванням.
- Швидкість тіла може бути напрямлена під будь-яким кутом до сили, що діє на тіло. Якщо швидкість тіла напрямлена так само, як сила, тіло рухається прямолінійно і його швидкість збільшується; якщо швидкість напрямлена протилежно напрямку сили, тіло рухається прямолінійно і його швидкість зменшується; якщо швидкість напрямлена під кутом до напрямку сили, тіло рухається криволінійно.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

### Перший рівень

1. Що таке маса тіла?
2. Унаслідок взаємодії двох тіл перше тіло набуває прискорення  $1 \text{ м/с}^2$ , а друге —  $5 \text{ м/с}^2$ . Маса якого тіла більша і в скільки разів?
3. Сформулюйте другий закон Ньютона.
4. Під дією сили  $6 \text{ Н}$  тіло набуває прискорення  $2 \text{ м/с}^2$ . Яка маса тіла?
5. Чому дорівнює сила тяжіння для тіла масою  $5 \text{ кг}$ ?
6. На людину діє сила тяжіння  $600 \text{ Н}$ . Яка маса людини?
7. У яких системах відліку справедливий другий закон Ньютона?
8. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла збігається з напрямом сили, що діє на нього.
9. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла протилежний напрямку сили, що діє на нього.
10. Наведіть приклад, коли напрям швидкості тіла перпендикулярний напрямку сили, що діє на нього.

### Другий рівень

11. Тіло масою  $5 \text{ кг}$ , рухаючись прямолінійно рівноприскорено, за  $5 \text{ с}$  пройшло  $25 \text{ м}$ . Чому дорівнює модуль рівнодійної сил, що діють на це тіло? Початкова швидкість тіла дорівнює нулю.

12. Гальмівний шлях автомобіля, що рухався зі швидкістю 108 км/год, дорівнює 90 м. Чому дорівнює сила тертя, якщо маса автомобіля 1 т?
13. М'яч кинули вертикально вгору. Коли модуль прискорення м'яча більший — під час піднімання чи під час спуску? Урахуйте, що сила опору повітря напрямлена протилежно швидкості тіла.
14. М'яч кинули вертикально вгору. У якій точці траєкторії прискорення м'яча точно дорівнює прискоренню вільного падіння? Розв'язуючи задачу, урахуйте силу опору повітря.
15. На тіло масою 10 кг діють дві сили, напрямлені вздовж однієї прямої. Тіло рухається з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ . Модуль однієї сили дорівнює 50 Н. Чому дорівнює модуль іншої сили?
16. На тіло масою 100 кг діють дві сили, напрямлені під прямим кутом одна до одної. Модуль однієї сили 300 Н, а модуль іншої сили 400 Н. З яким прискоренням рухається тіло?

## § 9. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Третій закон Ньютона
2. Властивості сил, з якими тіла взаємодіють
3. Приклади виявлення та застосування третього закону Ньютона
4. Вага і невагомість
5. Чи очевидний третій закон Ньютона?
6. Межі застосовності законів Ньютона

### 1. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Спостереження і досліди свідчать, що під час взаємодії двох тіл на *кожне* з них діє сила з боку *іншого* тіла. Наприклад, якщо ви б'єте рукою по м'ячу, то відчуваєте, що і м'яч «б'є» по вашій руці.

Це означає, що

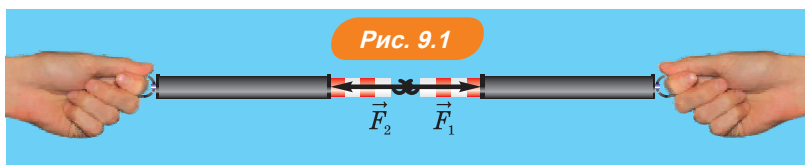
під час взаємодії тіла діють одне на одне з певними силами.

Яке ж співвідношення між силами?



#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

З'єднаємо два динамометри і тягтимемо їх урізнібіч, як показано на рисунку 9.1.



Ми побачимо, що покази динамометрів будуть *однаковими*.

Цей та інші подібні досліди свідчать, що виконується

*третьої закон Ньютона*: під час взаємодії тіла діють одне на одне із силами, що рівні за модулем і протилежні за напрямом:

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



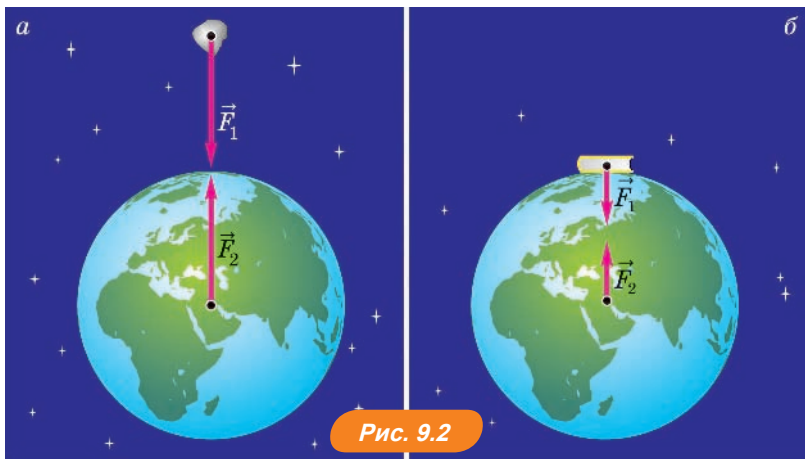
## 2. ВЛАСТИВОСТІ СИЛ, З ЯКИМИ ТІЛА ВЗАЄМОДІЮТЬ

Сили, з якими взаємодіють два тіла, мають *однакову фізичну природу*.

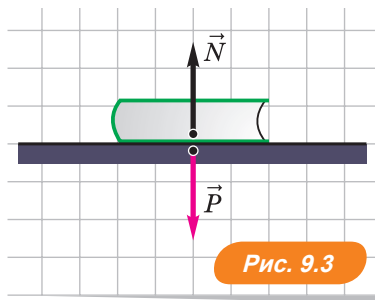
Розглянемо приклади.

1. На будь-яке тіло, що перебуває поблизу поверхні Землі, діє *сила тяжіння* з боку Землі.

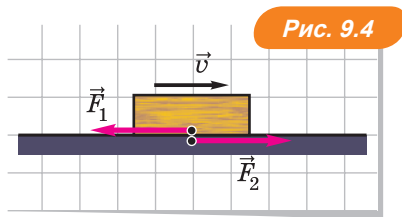
Ця сила діє на тіло незалежно від того, падає воно (рис. 9.2, *а*) чи перебуває у спокої (рис. 9.2, *б*). З боку тіла на Землю діє сила притягання, що точно дорівнює за модулем силі тяжіння. Чому ж дія цієї сили на Землю залишається непомітною? Далі ми розповімо про це.



2. Книга, що лежить на столі (рис. 9.3), тисне на опору із силою  $\vec{P}$  (вага книги), а стіл — на книгу із силою  $\vec{N}$  (сила нормальної реакції). Обидві ці сили за своєю фізичною природою є *силами пружності*.



3. Якщо штовхнути брусок, що лежить на столі, він почне ковзати по столу — пройде деяку відстань і зупиниться. Зменшення швидкості бруска під час ковзання зумовлене *силою тертя*, що діє на нього з боку стола. Така ж за модулем, але протилежно напрямлена сила тертя діє й на стіл з боку бруска (рис. 9.4). Дію сили тертя на стіл можна зробити помітнішою, якщо покласти на стіл тканину: ми побачимо, що брусок, рухаючись, «тягне» тканину за собою.



Чи можуть сили, з якими взаємодіють тіла, урівноважувати одна одну? Ні, не можуть, хоча вони рівні за модулем і напрямлені протилежно! Річ у тім, що ці сили діють на *різні* тіла, а врівноважувати одна одну можуть тільки сили, прикладені до *того самого* тіла.

### 3. ПРИКЛАДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТРЕТЬОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА

#### ХОДЬБА

Кожен із дитинства застосовує третій закон Ньютона на кожному кроці, навіть не підозрюючи про це.

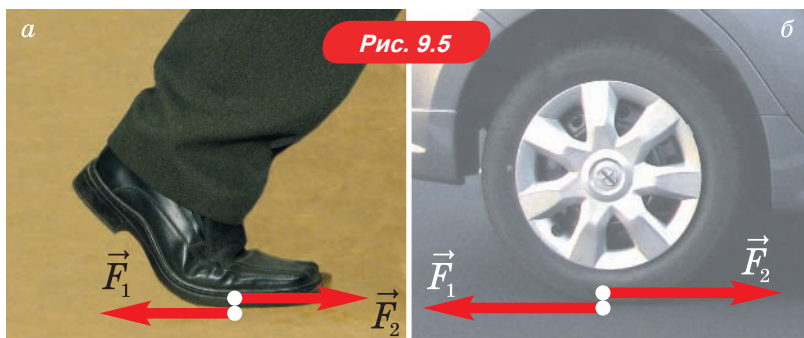
Наприклад, починаючи йти, ви набуваєте *прискорення в горизонтальному напрямі*. Згідно з другим законом Ньютона це означає, що на вас діє *горизонтально напрямлена сила*. Що ж це за сила? З боку якого тіла її прикладено?

Цією силою є *сила тертя*, що діє з боку дороги<sup>1</sup> на людину, яка йде. Людина штовхає *дорогу* назад, а дорога при цьому *відповідно до третього закону* Ньютона з такою самою за модулем силою штовхає *людину* вперед (рис. 9.5, а)!

#### СИЛА ТЯГИ

Автомобіль розганяється, теж «використовуючи» третій закон Ньютона: мотор обертає колесо автомобіля, а воно вна-

<sup>1</sup> «Дорогою» ми для стислості називаємо дорожнє полотно.



слідок цього штовхає дорогу *назад*. При цьому відповідно до третього закону Ньютона дорога штовхає автомобіль *уперед* (рис. 9.5, б).

Напрявлену вперед силу, що діє на автомобіль або інший транспортний засіб з боку дороги, іноді називають *силою тяги*.

Використовує третій закон Ньютона і весляр: він штовхає воду назад, а вода штовхає весляра разом з човном *уперед* (рис. 9.6).



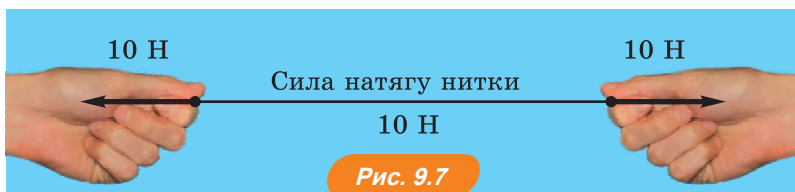
А завдяки чому може змінити свою швидкість тіло, коли до-вкола нього нічого немає і тому нема від чого відштовхнутися:

наприклад, якщо це тіло — космічний корабель, що перебуває у відкритому космосі? Відповідь на це запитання знайшов російський вчений і винахідник К. Е. Ціолковський. Про це, а також про внесок українських учених та інженерів в освоєння космосу ми розповімо в § 12. *Імпульс. Закон збереження імпульсу.*

## СИЛА НАТЯГУ НИТКИ АБО ТРОСА

### ? РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Нитку тягнуть за кінці в протилежні боки із силами  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (рис. 9.7). Чи рівні ці сили за модулем, якщо масою нитки можна знехтувати? Чому дорівнює сила натягу нитки, якщо  $\vec{F}_1 = 10 \text{ Н}$ ?



**Розв'язання.** Якщо сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  не рівні за модулем, то їх рівнодійна  $\vec{F}$  не дорівнює нулю. Отже, згідно з другим законом Ньютона нитка набуде прискорення  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , де  $m$  — маса нитки.

А тепер звернімо увагу на застереження в умові, виділене курсивом: саме в ньому вся «сіль» задачі! Оскільки масою нитки можна знехтувати, то нитка набула б величезного прискорення, якби рівнодійна  $\vec{F}$  не дорівнювала нулю.

Звідси випливає, що  $\vec{F} = 0$ , тобто протилежно напрямлені сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  *рівні за модулем.*

Силою натягу нитки в даному разі є сила, прикладена до будь-якого кінця нитки. У цьому випадку сила натягу нитки дорівнює 10 Н.

**Відповідь:** сили рівні за модулем; сила натягу нитки 10 Н.

Поширеними помилками в цій задачі є відповіді 0 і 20 Н. Щоб ці помилки стали очевидними, уявіть, що один кінець нитки прив'язано до кільця, закріпленого в стіні. Якщо тягти цю нитку із силою 10 Н, то очевидно, що сила натягу

нитки дорівнює 10 Н. Але ж відповідно до третього закону Ньютона кільце при цьому «тягне» нитку теж із силою 10 Н!

#### 4. ВАГА І НЕВАГОМІСТЬ

##### ЧОМУ ВАГА ТІЛА У СТАНІ СПОКОЮ ДОРІВНЮЄ СИЛІ ТЯЖІННЯ?

Розглянемо для прикладу сили, що діють на книгу, яка лежить на столі. Це сила тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$  і сила нормальної реакції  $\vec{N}$  (рис. 7.2). Вони врівноважують одна одну, тому

$$\vec{N} = -m\vec{g}.$$

Розглянемо тепер сили, з якими діють одне на одне книга і стіл. Це вага книги  $\vec{P}$  і сила нормальної реакції  $\vec{N}$  (рис. 7.1). Відповідно до третього закону Ньютона

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$

З рівнянь  $\vec{P} = -\vec{N}$  і  $\vec{N} = -m\vec{g}$  випливає, що

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Оскільки вага тіла, що перебуває в спокої, дорівнює силі тяжіння, а сила тяжіння пропорційна масі тіла, масу тіла, як ми вже говорили, часто виміряють *зважуванням* (рис. 9.8).



Вага дорівнює силі тяжіння не тільки для тіла, що перебуває в спокої, а й для тіла, що рухається з постійною (за модулем і напрямом) швидкістю, оскільки й у цьому випадку сила тяжіння і сила нормальної реакції, що діють на тіло, врівноважують одна одну.



## РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Через нерухомий блок перекинута невагому нерозтяжну нитку, до кінців якої підвішено вантажі рівної маси  $m$ . Чому дорівнює сила натягу нитки, якщо тертям у блоці можна знехтувати?

**Розв'язання.** Вантажі однакової маси урівноважаться, тобто вони або перебуватимуть у спокої, або рухатимуться з постійною швидкістю. У такому разі, як ми вже знаємо, вага тіла дорівнює силі тяжіння. А вага — це і є сила, з якою вантаж розтягує підвіс. У даному разі вага кожного вантажу за модулем дорівнює  $mg$ . Отже, сила натягу нитки дорівнює  $mg$ .

**Відповідь:**  $mg$ .

## ВАГА ТІЛА, ЩО РУХАЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ

Для того щоб знайти, чому дорівнює вага тіла, що рухається з прискоренням, розглянемо, наприклад, сили, які діють на книжку, що лежить у ліфті, коли цей ліфт рухається з прискоренням  $\vec{a}$ , напрямленим вгору.

На книжку діють дві сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила пружності  $\vec{N}$  з боку ліфта. А з боку книжки на ліфт діє сила пружності  $\vec{P}$  — вага книжки (рис. 9.9).

Але тепер сили  $m\vec{g}$  і  $\vec{N}$  не врівноважують одна одну, бо їх рівнодійна  $m\vec{g} + \vec{N}$  надає книжці прискорення  $\vec{a}$ . Згідно з другим законом Ньютона  $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}$ , а відповідно до третього закону Ньютона  $\vec{N} = -\vec{P}$ . Тому  $m\vec{a} = m\vec{g} - \vec{P}$ . Звідси отримуємо, що вага тіла, яке рухається з прискоренням, виражається формулою  $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ .

Зверніть увагу: вага тіла залежить тільки від прискорення і не залежить від швидкості.

У якому випадку вага тіла більша за силу тяжіння, а в якому — менша? Якщо прискорення тіла напрямлене вгору,  $|\vec{g} - \vec{a}| = g + a$ , тому  $P = m(g + a) > mg$ . Якщо ж прискорення напрямлене вниз (і не більше за модулем, ніж прискорення вільного падіння), то  $|\vec{g} - \vec{a}| = g - a$ , а отже,  $P = m(g - a) < mg$ .

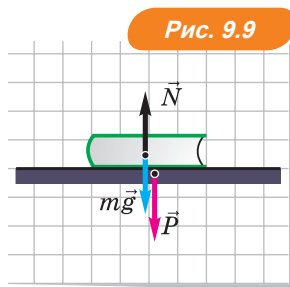


Рис. 9.9



## РОЗВ'ЯЖІМО ЗАДАЧУ

Вантаж масою 100 кг піднімають з напрямленим угору прискоренням, що дорівнює за модулем  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Якою є

сила натягу троса, яким піднімають вантаж?

**Розв'язання.** Сила натягу троса — це вага вантажу. Прискорення вантажу напрямлене вгору, тому в цьому випадку  $P = m(g + a) = 100 \cdot (10 + 2) = 1200$  (Н).

**Відповідь:** 1200 Н.

Зверніть увагу: якщо прискорення вантажу напрямлене *вгору*, то сила натягу троса *більша* від сили тяжіння, що діє на вантаж. Згідно з третім законом Ньютона з такою самою за модулем силою вантаж розтягує трос. А сила, з якою вантаж розтягує трос, і є вагою вантажу. Отже, якщо вантаж рухається з прискоренням, напрямленим угору, то вага вантажу

$$P = m(g + a).$$

Якщо ж прискорення тіла напрямлене *вниз* (але не більше за модулем, ніж прискорення вільного падіння), то вага тіла

$$P = m(g - a).$$

З цієї формули випливає, зокрема, що коли тіло рухається з прискоренням, рівним прискоренню вільного падіння, то його вага дорівнює *нулю*. Розглянемо цей випадок докладніше.

### НЕВАГОМІСТЬ

Коли тіло вільно падає, воно не тисне на опору і не розтягує підвіс. А це означає, що *вага тіла, яке вільно падає, дорівнює нулю*.

Стан, у якому вага тіла дорівнює нулю, називають *невагомістю*.

Зверніть увагу: у невагомості вага тіла дорівнює нулю, але сила тяжіння, як і раніше, дорівнює  $m\vec{g}$ .

У невагомості перебувають усі тіла, на які діє *тільки* сила тяжіння (наприклад, космонавти під час польоту з вимкненими двигунами — у цьому випадку космічний корабель і всі тіла, що є в ньому, рухаються тільки під дією сили тяжіння, тобто перебувають у невагомості).





На короткий час ви можете стати невагомим, просто підстрибнувши. З того моменту, коли ваші ноги відірвуться від підлоги, і до того моменту, коли вони торкнуться підлоги знову, ви перебуватимете в невагомості: адже при цьому ви не тиснете на опору і не розтягуєте підвіс. Яскраві враження від відчуття невагомості можна дістати, стрибаючи на батуті<sup>1</sup> (рис. 9.10). Але перебуваючи в невагомості протягом кількох секунд, не можна відчутти невагомість так, як її відчують космонавти, які перебувають у невагомості місяцями.

## 5. ЧИ ОЧЕВИДНИЙ ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Незважаючи на простоту формулювання третій закон Ньютон так само не очевидний, як і два перших.

Річ у тім, що *рівні за модулем* сили, з якими взаємодіють два тіла, далеко не завжди виявляють себе *однаково помітно*. Розглянемо приклади.

**Падіння каменя.** Коли камінь падає, збільшення його швидкості внаслідок дії сили притягання Землі добре помітне: швидкість каменя за кожну секунду збільшується приблизно на 10 м/с.

<sup>1</sup> Батут — це туго натягнута сітка для стрибків.



На Землю з боку каменя діє така сама за модулем сила притягання. Але внаслідок того, що маса Землі в багато разів більша від маси каменя, помітити зумовлене дією цієї сили прискорення Землі неможливо.

**Удар по м'ячу.** Коли футболіст б'є по м'ячу, м'яч різко змінює швидкість, але швидкість самого футболіста при цьому майже не змінюється. Це пояснюється не тільки тим, що маса футболіста набагато більша від маси м'яча. Важливо ще й те, що на футболіста з боку Землі діє велика сила тертя: саме для того, щоб збільшити її, футболісти і надягають бутси із шипами. Якби футболіст сильно бив по м'ячу, стоячи на льоду в туфлях, він під час удару теж набув би помітної швидкості.

«Неочевидність» простих на перший погляд законів природи (у тому числі трьох законів Ньютона) має глибокий сенс. Щоб у складних та взаємозалежних явищах природи помітити просту закономірність, потрібна проникливість справжнього вченого.

Вивчаючи фізику, ви й сьогодні стикаєтеся з тією ж «дивовижністю» і «неочевидністю» законів природи, що довгий час «заважала» людям побачити ці закономірності й відкрити закони природи.

## 6. МЕЖІ ЗАСТОСОВНОСТІ ЗАКОНІВ НЬЮТОНА

Усі фізичні закони й теорії є *наближенням* до дійсності, оскільки у будь-якій теорії використовується модель явищ і процесів. Тому як закони, так і теорії мають певні *межі застосовності*.

Мають межі застосовності й закони Ньютона. Наприклад, другий закон Ньютона, як ви знаєте, виконується тільки в інерціальних системах відліку.

Засновану на законах Ньютона теорію називають *класичною механікою*. Як показує досвід, класична механіка справедлива для руху тіл зі швидкостями, набагато меншими від швидкості світла. Якщо ж швидкості тіл порівнянні зі швидкістю світла (з такими швидкостями рухаються відносно Землі, наприклад, віддалені галактики та елементарні частинки в прискорювачах), висновки класичної механіки суперечать дослідям і спостереженням. Для тіл, що рухаються зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла, справедлива *спеціальна теорія відносності*, створена видатним фізиком Альбертом Ейнштейном<sup>1</sup> на

<sup>1</sup> Ейнштейн жив і працював у Швейцарії, Німеччині та США.

початку 20-го століття. Основні положення спеціальної теорії відносності ми розглянемо в *Розділі 3. Релятивістська механіка*.

Класичну механіку не можна застосовувати також для опису руху та взаємодії частинок дуже малої маси — наприклад, електронів. Тому в межах класичної механіки не можна зрозуміти, скажімо, особливості будови атома. Для розуміння атомних явищ на початку 20-го століття зусиллями декількох учених різних країн було створено *квантову механіку*. Основні її положення розглядатимуться в курсі фізики 11-го класу.

### ПРО ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ

- Третій закон Ньютона: під час будь-якої взаємодії тіла діють одне на одне із силами, що рівні за модулем і протилежні за напрямом:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .
- Властивості сил, з якими тіла взаємодіють одне з одним: вони мають однакову фізичну природу і не врівноважують одна одну, оскільки прикладені до різних тіл.
- Вага тіла, що вільно падає, дорівнює нулю. Стан, у якому вага тіла дорівнює нулю, називають невагомістю.
- Закони Ньютона мають певні межі застосовності.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

#### Перший рівень

1. Які спостереження вказують на те, що тіла, які взаємодіють, впливають одне на одне?
2. Сформулюйте третій закон Ньютона.
3. Чи однакову фізичну природу мають сили, з якими тіла взаємодіють?
4. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил пружності.
5. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил тяжіння.
6. Наведіть приклад, коли два тіла взаємодіють за допомогою сил тертя.
7. Чи можуть сили, з якими два тіла взаємодіють, урівноважувати одна одну?
8. Чому рівні за модулем сили, з якими два тіла взаємодіють, не завжди виявляють себе однаково помітно? Наведіть приклади, коли дія однієї з цих сил залишається непоміченою.

9. На столі лежить книга. Які сили діють на неї? Чи врівноважують вони одна одну? Чи мають вони однакову фізичну природу? Чи пов'язані ці сили третім законом Ньютона?
10. Мати говорить маленькому синові: «Не тягни собаку за хвіст!» А син відповідає матері: «Я не тягну, а лише тримаю. Він сам тягне!» Хто має рацію з точки зору третього закону Ньютона: мати чи син?
11. Чому на льоду важко розганятися?

### Другий рівень

12. Більярдна куля, рухаючись, стикається з такою ж кулею, що перебуває у стані спокою. Прискорення якої кулі під час удару більше?
13. Доведіть, що вага тіла, яке перебуває у стані спокою, дорівнює силі тяжіння.
14. Чи завжди вага тіла дорівнює силі тяжіння?
15. Чому якісна дорога має бути з твердим покриттям?
16. Що таке невагомість? За якої умови тіло перебуває у невагомості?
17. Кінь зрушує з місця візок. Згідно з третім законом Ньютона кінь і візок діють один на одного з однаковими за модулем і протилежно напрямленими силами. Чому ж тоді кінь з візком рухаються з прискоренням, напрямленим уперед?
18. Два хлоп'ячі гурти змагаються в перетягуванні каната, і один гурт перемагає. Поясніть, як у цьому змаганні може бути переможець, якщо згідно з третім законом Ньютона обидва гурти тягнуть канат з однаковими за модулем силами. Вважайте, що масою каната можна нехтувати.
19. Складіть задачу за темою «Третій закон Ньютона», відповіддю якої було б «Сила натягу троса дорівнює 200 Н».