

ФІЗИКА

10 РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

За навчальною програмою
авторського колективу
під керівництвом Локтева В. М.

Підручник для 10 класу
закладів загальної середньої освіти

За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

Харків
Видавництво «Ранок»
2018

УДК [37.016:53](075.3)
Ф50

Підручник створено авторським колективом у складі:
В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна

Автори й видавництво висловлюють щирю подяку:
М. М. Кірюхіну, президенту Спілки наукових і інженерних об'єднань України,
кандидату фізико-математичних наук;

І. С. Чернецькому, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань
Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук,
за створення відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

*Методичний апарат підручника успішно пройшов експериментальну перевірку
в Національному центрі «Мала академія наук України»*

Ф50 **Фізика** (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / [В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Харків : Вид-во «Ранок», 2018. : іл., фот.

ISBN

УДК [37.016:53](075.3)



Інтернет-підтримка
Електронні матеріали
до підручника розміщено на сайті
interactive.ranok.com.ua

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я.,
Кірюхіна О. О., 2018

© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2018

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2018

ISBN

ЗМІСТ

Передмова	5
---------------------	---

Вступ

§ 1. Зародження й розвиток фізики як науки	7
§ 2. Методи наукового пізнання. Фізичні величини та їх вимірювання. Невизначеності вимірювань	12
§ 3. Скалярні та векторні величини	19

Розділ. I. Механіка

Частина 1. Кінематика

§ 4. Основна задача механіки. Абетка кінематики	24
§ 5. Швидкість руху. Середня та миттєва швидкості. Закони додавання переміщень і швидкостей	30
§ 6. Рівноприскорений прямолінійний рух. Прискорення	37
§ 7. Вільне падіння та криволінійний рух під дією незмінної сили тяжіння	44
§ 8. Рівномірний рух матеріальної точки по колу.	52
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Визначення прискорення тіла в ході рівноприскореного прямолінійного руху.	57
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Вивчення руху тіла по колу	58
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 1	59
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1	60

Частина 2. Динаміка і закони збереження

§ 9. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона	62
§ 10. Сила. Маса. Другий та третій закони Ньютона	68
§ 11. Гравітаційне поле. Сила тяжіння. Перша космічна швидкість	74
§ 12. Сила пружності. Вага тіла	79
§ 13. Сила тертя	84
§ 14. Рівновага тіл. Момент сили	89
§ 15. Механічна робота. Кінетична енергія. Потужність	92
§ 16. Потенціальна енергія. Закон збереження механічної енергії	97
§ 17. Імпульс тіла. Реактивний рух. Пружне та непружне зіткнення.	102
§ 18. Рух рідини та газу. Підймальна сила крила	107
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Дослідження руху зв'язаних тіл	111
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Визначення центра мас плоскої пластини двома способами.	112
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 2	113
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2	114

Частина 3. Механічні коливання і хвилі

§ 19. Види механічних коливань	116
§ 20. Математичний і пружинний маятники. Енергія коливань	121
§ 21. Резонанс	127
§ 22. Механічні хвилі	131
§ 23. Звукові хвилі	139
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Дослідження коливань нитяного маятника	145
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 3	146
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 3	147
Енциклопедична сторінка.	148
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень	150

Розділ II. Елементи спеціальної теорії відносності

§ 24. Постулати теорії відносності. Релятивістський закон додавання швидкостей.	152
§ 25. Наслідки постулатів спеціальної теорії відносності.	159
Підбиваємо підсумки розділу II.	160

Розділ III. Молекулярна фізика і термодинаміка

Частина 1. Молекулярна фізика

§ 26. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. Маса та розміри атомів і молекул. Кількість речовини	162
§ 27. Рух і взаємодія молекул	166
§ 28. Модель ідеального газу. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу	171
§ 29. Термодинамічна рівновага. Температура. Температурна шкала Кельвіна	174
§ 30. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроцеси	178
§ 31. Пароутворення та конденсація. Насичена та ненасичена пара. Кипіння	183
§ 32. Вологість повітря. Точка роси	189
§ 33. Поверхневий натяг рідини. Змочування. Капілярні явища	194
§ 34. Будова та властивості твердих тіл. Анізотропія кристалів. Рідкі кристали	197
§ 35. Механічні властивості твердих тіл.	201
<i>Лабораторная робота № 6. Дослідження ізопроцесів у газах</i>	206
<i>Лабораторная робота № 7. Вимірювання відносної вологості повітря.</i>	207
Підбиваємо підсумки розділу III. Частина 1.	208
Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 1	209

Частина 2. Основи термодинаміки

§ 36. Внутрішня енергія. Способи зміни внутрішньої енергії	210
§ 37. Робота в термодинаміці.	214
§ 38. Перший закон термодинаміки. Адіабатний процес	217
§ 39. Принцип дії теплових двигунів. Холодильна машина.	223
Підбиваємо підсумки розділу III. Частина 2.	230
Завдання для самоперевірки до розділу III. Частина 2	231
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень	232

Розділ IV. Електричне поле

§ 40. Абетка електростатики	234
§ 41. Електричне поле	237
§ 42. Робота з переміщення заряду в електростатичному полі. Потенціальна енергія взаємодії точкових зарядів	242
§ 43. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів	246
§ 44. Провідники в електростатичному полі	250
§ 45. Діелектрики в електростатичному полі. Поляризація діелектриків	255
§ 46. Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора	259
Підбиваємо підсумки розділу IV	264
Завдання для самоперевірки до розділу IV	265
Енциклопедична сторінка.	266
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень	268
Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки.	269
Алфавітний покажчик	271

Дорогі друзі!

Ви вивчаєте фізику вже четвертий рік. Сподіваємося, ви зуміли оцінити достоїнства цієї дивовижної науки про природу, більш того — намагаєтесь, використовуючи набуті знання, усвідомлювати й пояснювати процеси, що відбуваються навколо.

Цього навчального року на вас знову чекає зустріч із механікою, механічним рухом, але вже на більш високому рівні. Ви дізнаєтесь про те, що пояснюють закони І. Ньютона і чим класична механіка відрізняється від «релятивістської механіки» А. Ейнштейна, якої швидкості має набути ракета-носій, щоб вивести супутник на орбіту, чому супутники обертаються навколо Землі й не губляться в космічному просторі та багато іншого.

Усі параграфи підручника завершуються рубриками: «*Підбиваємо підсумки*», «*Контрольні запитання*», «*Вправа*».

У рубриці «*Підбиваємо підсумки*» подано відомості про основні поняття та явища, з якими ви ознайомилися в параграфі. Отже, ви маєте можливість іще раз звернути увагу на головне.

«*Контрольні запитання*» допоможуть з'ясувати, чи зрозуміли ви вивчений матеріал. Якщо ви зможете відповісти на кожне запитання, то все гаразд, якщо ж ні, знову зверніться до тексту параграфа.

Виявити свою компетентність і застосувати набуті знання на практиці допоможе матеріал рубрики «*Вправа*». Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які слід виявити кмітливість і наполегливість. Номер кожного завдання має свій колір (у порядку підвищення складності: синій, зелений, оранжевий, червоний, фіолетовий).

Серед завдань є такі, що слугують для повторення матеріалу, який ви вже вивчали в курсах природознавства, математики або на попередніх уроках фізики.

Для тих, хто прагне знати більше про перспективи розвитку ринку праці та вже замислюється над вибором майбутньої професії, призначена рубрика «*Професії майбутнього*».

Рубрика «Фізика у цифрах» слугує містком, що пов'язує новітні досягнення техніки з навчальним матеріалом параграфів.

Чимало цікавого та корисного ви дізнаєтеся завдяки *інтернет-підтримці*. Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання та лабораторні роботи*. Обов'язково виконуйте їх — і ви будете краще розуміти й любити фізику.

Матеріали, запропоновані наприкінці кожного розділу в рубриках «Підбиваємо підсумки розділу» і «Завдання для самоперевірки», допоможуть систематизувати отримані знання, будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Для тих, хто хоче більше дізнатися про розвиток фізичної науки й техніки в Україні та світі, знайдеться чимало цікавого й корисного в рубриках «Фізика і техніка в Україні» та «Енциклопедична сторінка».

Зверніть увагу на те, що в підручнику використано позначки, які допоможуть вам орієнтуватися в поданому матеріалі:



Підбиваємо підсумки



Завдання на повторення



Контрольні запитання



Експериментальне завдання



Вправа



Інтернет-підтримка

Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!

ВСТУП



§ 1. ЗАРОДЖЕННЯ Й РОЗВИТОК ФІЗИКИ ЯК НАУКИ



Ще зовсім недавно люди навіть не могли мріяти про можливості, які мають зараз. Досягнення в таких галузях, як робототехніка, штучний інтелект, нанотехнології, 3D-друк, генетика, біотехнологія, сьогодні швидко взаємодоповнюються. Розумні системи, що вже створені або тільки створюються: будинки, фабрики, ферми або навіть міста — допоможуть вирішувати різні проблеми людства. Зрозуміло, що все зазначене не може не впливати на формування світогляду сучасної людини. Разом із тим слід завжди пам'ятати, що нові відкриття — це не тільки прогрес, але й величезна відповідальність.

У сучасному світі — бурхливому, суперечливому й одночасно взаємозалежному — важливим є усвідомлення того, що світ пізнаний, що випадковість не тільки плутає і порушує наші плани, але й створює нові можливості; що існують незмінні орієнтири-інваріанти; що в міру розвитку знань відбувається руйнування старих «рамок» наших уявлень. Передбачаємо ваше запитання: а до чого тут природничі науки? Сподіваємося, наприкінці 11 класу ви самі зможете на нього відповісти. А зараз лише зазначимо, що всі ці висновки впливають із істин, відкритих природничими науками, оскільки їх закономірності та принципи мають глобальний характер і тому виходять за межі власне наук.

1

Які етапи пройшла фізика під час свого розвитку

Історія фізики — це довжелезна історія відкриттів. І з кожним із них поглиблюється наше розуміння природи. За будь-яким відкриттям — конкретна людина, а частіше група людей, чиїми зусиллями фізика як наука підіймалася на новий щабель розвитку. Ви вже знаєте багато імен людей, чия діяльність сприяла прогресу фізичної науки. Спробуємо систематизувати знання про дослідників природи й першовідкривачів невідомого та простежимо, як накопичувалися фізичні знання.

ОСНОВНІ ЕТАПИ

Із кінця XIX/початку XX ст. Зв'язок властивостей простору-часу з енергією та імпульсом матеріальних тіл був установлений А. Ейнштейном у загальній теорії відносності. Учений узагальнив результати І. Ньютона щодо гравітаційної взаємодії тіл для випадку руху із великими швидкостями.

Фундамент квантової механіки на початку XX ст. заклали М. Планк, А. Ейнштейн, Н. Бор, М. Борн.

Із відкриттям А. Беккерелем радіоактивності почався розвиток ядерної фізики, який сприяв появі нових видів енергії — атомної енергії та енергії ядерного синтезу. Відкриття, зроблені в ході досліджень ядерних реакцій, започаткували фізику елементарних частинок.

Сучасні уявлення про Великий вибух, чорні діри, розширення Всесвіту із прискоренням, про темну енергію пов'язані з працями Е. Хаббла, Р. Опенгеймера, Х. Снайдера, Дж. Уйлера, С. Гокінга та ін.



Ернест Резерфорд

Установлення структури атома як системи, що складається з малого за розмірами ядра, яке має позитивний заряд, та електронів, заряджених негативно. Е. Резерфорд вважається «батьком» ядерної фізики.

1871–1937

Створення теорії електромагнітного поля, яка пояснювала всі відомі на той час факти й дозволяла передбачати нові явища.

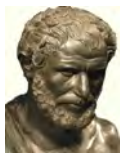


Джеймс Максвелл

1831–1879

Сучасна фізика

Висунення ідеї атомарної будови матерії. Експериментально цю ідею було підтверджено тільки на початку XX ст.



Демокріт



Аристотель

Узагальнення та систематизація знань у царині природничих наук. Роботи Аристотеля до XVI ст. вважалися «безумовною істиною». Уявлення філософа про звукові хвилі збереглися і в сучасній фізиці.

Становлення фізики

бл. 460 —
бл. 370 рр. до н. е.

384–322 рр. до н. е.

бл. 310 —
бл. 230 рр. до н. е.

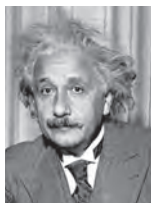
З давніх часів до кінця XVI ст. Передісторія фізики — це період накопичення фізичних знань, закладання наукових уявлень про властивості навколишнього світу. Величезний вплив на формування фізичних понять і закономірностей здійснили мислителі Стародавньої Греції: Аристотель, Архімед, Аристарх Самоський, Демокріт, Левкіпп, Піфагор, Птолемей, Евклід.

Висунення ідеї геліоцентричної (від грец. *Helios* — Сонце) будови світу. Теоретичне пояснення цієї ідеї з'явилося майже через 2000 років по тому.



Аристарх Самоський

РОЗВИТКУ ФІЗИКИ



**Альберт
Ейнштейн**

Один із засновників сучасної теоретичної фізики; за словами самого вченого, справжня мета його досліджень «завжди полягала в тому, щоб домогтися спрощення теоретичної фізики та її об'єднання в цілісну систему».

1879–1955



**Нільс
Бор**

Створець квантової теорії планетарного атома, розроблення фізичних ідей квантової механіки.

1885–1962

Кінець XVII ст. — кінець XIX/початок XX ст. Період починається побудовою І. Ньютоном першої фізичної (механічної) картини світу й продовжується бурхливим розвитком галузі фізики, пов'язаної з використанням теплових двигунів (Дж. Ватт, С. Карно). Вивчення електричних і магнітних явищ (Ш. Кулон, А. Ампер, Г. Ерстед, М. Фарадей) завершується створенням Дж. Максвеллом рівнянь електромагнітного поля, які стали теоретичною основою для сучасної електротехніки та радіозв'язку.

1642–1727



Ісаак Ньютон

Розуміння будови Сонячної системи, формулювання загальних уявлень про будову Всесвіту й основних законів механіки, які визначили розвиток фізики на 300 років наперед.

Класична фізика

Відкриття принципу відносності в механіці, обґрунтування геліоцентричної будови світу, створення телескопу, відкриття в астрономії, винахід термометра та ін.

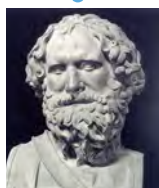


Галілео Галілей

1564–
1642

Формування фізики як науки

287–212 pp. до н. е.



Архімед

Уведення поняття центра тяжіння, побудова теорії рівноваги важеля, визначення моменту сил, відкриття законів плавання тіл. Здобутки вченого в інженерії — основа для багатьох сучасних механізмів.

Початок XVII ст. — 80 pp. XVII ст. Розвиток фізики як науки пов'язують із ім'ям Г. Галілея, експерименти якого заклали фундамент класичної механіки. Розвиток ремесел і судноплавства стимулював дослідження, що спираються на експеримент. У цей період створюють барометр (Е. Торрічеллі), формулюють газовий закон (Р. Бойль, Е. Маріотт), відкривають закон заломлення світла (В. Снелліус, Р. Декарт), розмежовують електричні та магнітні явища (У. Гільберт).

2 Які питання турбують сучасних фізиків

Практично кожного дня з'являється нова інформація та нові знання про світ, що нас оточує, причому їх об'єм настільки значний, що іноді вони застарівають раніше, ніж ми встигаємо про них дізнатися (рис. 1.1).

Незважаючи на великий обсяг накопичених знань, сучасна фізика ще дуже далека від пояснення всіх явищ природи. На думку британського фізика Стівена Гокінґа, «прогрес полягає не в заміні неправильної теорії на правильну, а в заміні неправильної теорії на неправильну, але вже уточнену».

Багато десятиліть учені намагаються створити теорію, яка пояснювала б Всесвіт, об'єднавши теорії фундаментальних взаємодій: сильної, слабкої, електромагнітної, гравітаційної. Певні успіхи в цьому напрямі вже досягнуто: у фізиці елементарних частинок створено *Стандартну модель* — теорію, що об'єднує сильну, слабку й електромагнітну взаємодії елементарних частинок.

На сьогодні Стандартна модель добре узгоджується з експериментами, і нещодавне відкриття бозона Хіґса є тому яскравим підтвердженням. Проте фізики намагаються вийти за межі цієї моделі та дізнатися про речі, які поки що пояснити не можуть, наприклад, чому у світі практично немає античастинок й антиматерії.

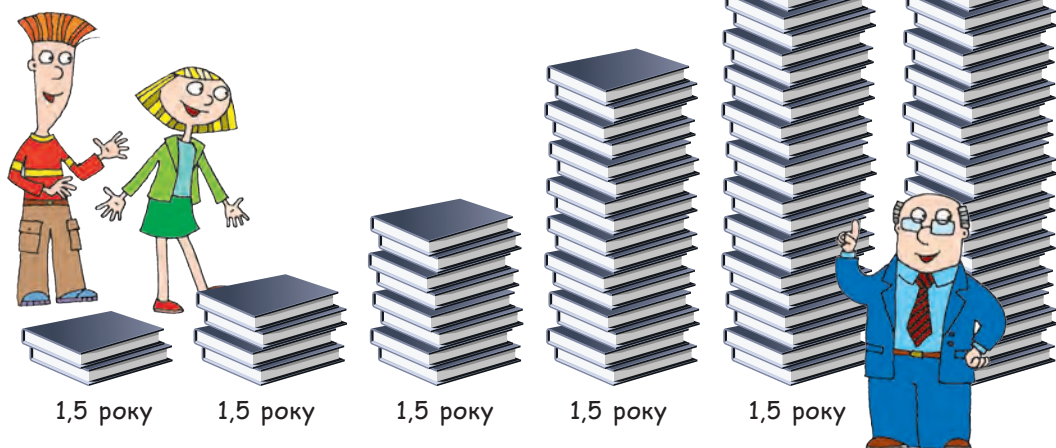


Рис. 1.1. За даними досліджень, обсяг інформації безперервно зростає. У наш час він подвоюється кожні півтора року. Сучасна людина за місяць отримує стільки інформації, скільки людина XVII ст. отримувала протягом життя. Щоб рухатися в ногу з часом, нам потрібно безперервно займатися самоосвітою

Тому нині в Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) в Женеві активно проводять експерименти з дослідження процесів, що відбуваються під час зародження Всесвіту. Тож чекаємо на нові відкриття!



Контрольні запитання

1. Які етапи розвитку пройшла фізика як наука? Які ідеї розвивалися на кожному з етапів?
2. Якими проблемами опікується сучасна фізика?
3. Назвіть імена відомих вам учених-фізиків. У якій галузі фізики вони працювали?
4. Відкриття в яких областях фізики дозволили створити побутові пристрої? Наведіть приклади.



Вправа № 1

1. У тексті § 1 було названо ім'я лише одного філософа Давньої Греції, що висунув гіпотезу про атомарну будову речовини. Які ще філософи того часу висловлювали таку ідею?
2. Чим прославився Архімед як інженер? Які його винаходи зараз можна побачити навіть на дитячих майданчиках?
3. Уявіть, що ви SMM-менеджер освітньої установи, та напишіть переконливий пост на тему «Чому дизайнерові (чи будь-якому іншому сучасному фахівцю) необхідно вивчати фізику».
4. Унаслідок неправильного використання технологій загинули і ще можуть загинути тисячі людей, змінилися і можуть змінитися на гірше долі мільйонів. Наведіть приклади на підтвердження або спростування цієї тези. Проведіть із друзями дискусію на тему «Чи може науково-технічний прогрес довести людство до глобальної катастрофи». Сформулюйте та запишіть основні результати обговорення.
5. Чи стикалися ви з неправдивою інформацією в Інтернеті? Якщо так, то що саме допомогло вам з'ясувати, що інформація неправдива? Сформулюйте свої поради з цього приводу.

Фізика і техніка в Україні



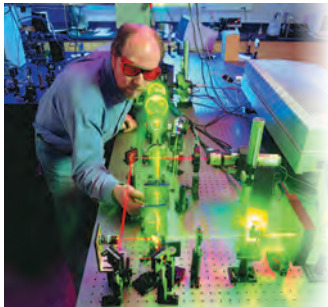
Інститут теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАНУ (Київ) — провідний науковий центр із фундаментальних проблем теоретичної, математичної та обчислювальної фізики, створений у 1966 р. Засновником інституту та його першим директором був усесвітньо відомий фізик-теоретик і математик, академік *Микола Миколайович Боголюбов*.

Тематика наукових досліджень інституту охоплює широке коло проблем астрофізики й космології, фізики високих енергій, теорії ядерних систем, квантової теорії молекул і кристалів.

В інституті працює Науково-освітній центр для обдарованих школярів і студентів.

Із 2002 р. директором інституту є видатний учений в галузі теоретичної фізики, зокрема теорії та моделювання плазмових процесів, академік *Анатолій Глібович Загородній*.

§ 2. МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ВИМІРЮВАННЯ. НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ



Чим відрізняється мова фізики (та й будь-якої іншої точної науки) від звичайної мови? Мова фізики інтернаціональна: вона створювалася найкращими умами всіх народів, її однозначно розуміють у будь-якому куточку нашої планети. Мова фізики об'єктивна: кожне її поняття має один зміст, який може змінитися (найчастіше — розширитися) тільки завдяки досліддам.

Як і методи наукового пізнання, мова фізики народилася із практики. Про методи фізичних досліджень і деякі поняття мови фізики ви згадаєте в цьому параграфі.

1 Що таке фізичне дослідження та які його методи

Згадаємо, із чого починається дослідницька робота вчених. Перш за все — це *спостереження* за певним явищем (тілом або матеріалом) і міркування над його сутністю.

Спостереження — це сприйняття природи з метою одержання первинних даних для подальшого аналізу.

Але далеко не завжди спостереження ведуть до правильного висновку. Тому, щоб спростувати або довести власні висновки, учений проводить фізичне дослідження.

Фізичне дослідження — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики.

Методи фізичних досліджень

Експериментальний метод	Теоретичний метод
<p><i>Експеримент</i> — дослідження фізичного явища в умовах, які перебувають під контролем ученого.</p> <p>У своїй основі фізика є експериментальною наукою: більшість її законів ґрунтуються на фактах, установлених дослідним шляхом</p>	<p>Аналіз отриманих у результаті експериментів даних, формулювання законів природи, пояснення певних явищ і властивостей на основі цих законів, а головне — передбачення й теоретичне обґрунтування (із широким використанням математики) нових явищ і властивостей</p>

? Які спостереження, теоретичні й експериментальні дослідження ви могли б провести, щоб дослідити світіння звичайної лампи розжарення.

Теоретичні дослідження проводять не з конкретним фізичним тілом, а з його ідеалізованим аналогом — **фізичною моделлю**, яка має враховувати невелику кількість деяких основних властивостей досліджуваного тіла. Так, вивчаючи рух автомобіля, ми інколи використовуємо його фізичну модель — *матеріальну точку* (рис. 2.1, а). Цю модель застосовують, якщо розміри тіла не є суттєвими для теоретичного опису, тобто в моделі «матеріальна точка»

враховують тільки масу тіла, а його форму та розміри до уваги не беруть. А от якщо необхідно визначити, як на рух автомобіля впливає опір повітря, доцільно застосовувати вже іншу фізичну модель — вона має враховувати і форму, і розміри автомобіля (рис. 2.1, б), але не буде враховувати, наприклад, скільки пального витрачає автомобіль. Чим більше обрано відповідних параметрів для дослідження фізичної системи «автомобіль», тим краще можна передбачити його «поведінку».

? Чому ми ніколи не зможемо врахувати всі параметри системи «автомобіль»?

2 Як виміряти фізичну величину

Описуючи, наприклад, рух автомобіля, ми обов'язково використовуємо певні *кількісні характеристики*: швидкість, прискорення, час руху, силу тяги, потужність тощо. Із попереднього курсу фізики ви знаєте, що *кількісну міру певної властивості тіла, певного фізичного процесу або явища називають фізичною величиною*.

Значення фізичної величини встановлюють у ході вимірювання.

Вимірювання бувають **прямі** та **непрямі**.

У разі *прямих вимірювань* величину порівнюють із її одиницею (метром, секундою, кілограмом, ампером тощо) за допомогою вимірювального приладу, проградуйованого у відповідних одиницях (рис. 2.2).

? Назвіть кілька фізичних величин, значення яких ви знаходили за допомогою прямих вимірювань. У яких одиницях вимірюють ці величини? якими приладами?

У разі *непрямих вимірювань* величину обчислюють за результатами прямих вимірювань інших величин, пов'язаних із вимірюваною величиною певною функціональною залежністю. Так, щоб обчислити середню густину ρ тіла, потрібно за допомогою терезів виміряти його масу m , за допомогою, наприклад, мензурки виміряти об'єм V , а потім масу поділити на об'єм:

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



Рис. 2.1. Визначаючи швидкість і час руху автомобіля, можна застосовувати фізичну модель «матеріальна точка» (а); визначаючи аеродинамічні властивості автомобіля, цю фізичну модель застосовувати не можна (б)



Рис. 2.2. Сучасні прилади для прямого вимірювання температури (а); маси (б); швидкості руху (в)

Основні одиниці СІ

- **кілограм** (1 кг, 1 kg)
одиниця *маси*
- **метр** (1 м, 1 m)
одиниця *довжини*
- **секунда** (1 с, 1 s)
одиниця *часу*
- **ампер** (1 А, 1 A)
одиниця *сили струму*
- **моль** (1 моль, 1 mol)
одиниця *кількості речовини*
- **кельвін** (1 К, 1 K)
одиниця *температури*
- **кандела** (1 кд, 1 kd)
одиниця *сили світла*



Використовувався в 1899–1960 рр.

3 Побудова системи одиниць

Завдання вибудувати систему одиниць на науковій основі було поставлено перед французькими вченими наприкінці XVIII ст., після Великої французької революції. У результаті з'явилася метрична система одиниць. У 1960 р. було створено **Міжнародну систему одиниць СІ**, яка згодом стала у світі домінуючою.

Історично одиниці фізичних величин пов'язували з певними природними тілами або процесами. Так, 1 метр пов'язаний із розмірами планети Земля, 1 кілограм — із певним об'ємом води, 1 секунда — із добовим обертанням Землі. Потім для кожної одиниці створювався **еталон** — *засіб (або комплекс засобів) для відтворення та зберігання одиниці фізичної величини*. Основні еталони зберігалися (і зберігаються зараз) у Міжнародному бюро мір і ваг (м. Севр, Франція).

Зараз дедалі більше поширюються методи побудови системи одиниць, які ґрунтуються на особливостях випромінювання та поширення електромагнітних хвиль і на фундаментальних фізичних константах.

Розглянемо *основні етапи побудови системи одиниць на прикладі метра і кілограма*.

1 метр — довжина 1/10 000 000 частини чверті меридіана Землі, який проходить через Париж (Франція)

Спеціальний відрізок, калібрований за довжиною. Довжину цього відрізка визначено як 1 метр

1 метр дорівнює шляху, який проходить світло у вакуумі за інтервал часу 1/299 792 458 секунди

1 кілограм — маса 1 літра чистої води за температури 4 °С і атмосферного тиску 760 мм рт. ст.

Платиново-іридієвий циліндр, діаметр і висота якого 39 мм. Масу цього зразка визначено як 1 кілограм

Поки залишається платиново-іридієвий циліндр, але планується пов'язати 1 кілограм зі сталою Планка або з числом Авогадро

Створений у 1899 р.



Нагадаємо, що для зручності записи великих і малих значень фізичних величин використовують *кратні та частинні одиниці*.

- **Кратні одиниці** є більшими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів. **Частинні одиниці** є меншими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів.

Назви кратних і частинних одиниць містять певні префікси. Наприклад, **кілометр** (1000 м, або 10^3 м) — кратна одиниця довжини, **міліметр** (0,001 м, або 10^{-3} м) — частинна одиниця довжини (див. [табл. 1](#)).

4 Як виміряти фізичну величину

У ході вимірювання будь-якої фізичної величини зазвичай виконують три послідовні операції: 1) вибір, перевірка та встановлення приладу (приладів); 2) зняття показів приладів; 3) обчислення шуканої величини за результатами вимірювань, оцінювання похибки.

Наприклад, слід виміряти на місцевості відстань близько 50 м. Зрозуміло, що для цього не треба брати учнівську лінійку — зручніше скористатися рулеткою. Усі прилади мають певну точність, тому слід ознайомитися з будовою рулетки та встановити її точність. Відстань у 50 м, як правило, не потрібно визначати з точністю до міліметра, тому рулетка може й не містити відповідних поділок.

А от якщо для поладження лабораторного крана необхідно визначити розмір дрібної шайби, доцільно скористатися штангенциркулем (див. [рис. 2.3](#)).

Але навіть за допомогою надточного приладу не можна здійснити вимірювання *абсолютно* точно. Завжди є **похибки (невизначеності) вимірювань** — відхилення значення виміряної величини від її істинного значення.

Модуль різниці між вимірним ($x_{\text{вим}}$) та істинним (x) значеннями вимірюваної величини називають **абсолютною похибкою вимірювання** Δx :

$$\Delta x = |x_{\text{вим}} - x|$$

Відношення абсолютної похибки до виміряного значення вимірюваної величини називають **відносною похибкою вимірювання** ε_x :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}}, \text{ або у відсотках: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100 \%$$

Таблиця 1
Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць

Префікс	Позначення	Множник
атто-	а	10^{-18}
фемто-	ф	10^{-15}
піко-	п	10^{-12}
нано-	н	10^{-9}
мікро-	мк	10^{-6}
мілі-	мл	10^{-3}
санти-	с	10^{-2}
кіло-	к	10^3
мега-	М	10^6
гіга-	Г	10^9
тера-	Т	10^{12}
пета-	п	10^{15}
екса-	е	10^{18}



Рис. 2.3. Штангенциркуль. Точність вимірювання зображеним приладом — соті частки міліметра

Похибки в ході вимірювань фізичних величин бувають **випадкові та систематичні**.

Випадкові похибки	Систематичні похибки
<p><i>Випадкові похибки пов'язані з процесом вимірювання.</i></p> <p>Вимірюючи рулеткою відстань, неможливо прокласти рулетку ідеально рівно; вимірюючи масу тіла на важільних терезах, неможливо уникнути тертя й т. д.</p> <p>Щоб покращити результати, вимірювання проводять кілька разів і визначають <i>середнє значення вимірюваної величини</i>:</p> $x_{\text{вим}} = x_{\text{сер}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$ <p>де x_1, x_2, \dots, x_N — результати кожного з N вимірювань.</p> <p>У даному разі <i>випадкову абсолютну похибку</i> $\Delta x_{\text{вип}}$ можна обчислити за формулою:</p> $\Delta x_{\text{вип}} = \frac{ x_1 - x_{\text{вим}} + x_2 - x_{\text{вим}} + \dots + x_N - x_{\text{вим}} }{N}$ <p>Якщо вимірювання проводилися <i>один раз</i>, то <i>випадкова похибка дорівнює половині ціни поділки шкали приладу</i></p>	<p><i>Систематичні похибки пов'язані насамперед із вибором приладу.</i></p> <p>Неможливо знайти рулетку з ідеально точним розбиттям шкали, абсолютно точні гири, ідеально рівноплечі важелі тощо. Систематичні похибки визначаються якістю приладу — його класом точності, тому їх часто називають <i>похибками приладу</i>.</p> <p>У процесі експлуатації точність приладів може зменшуватися, тому їх необхідно періодично перевіряти в Бюро мір і ваг (в Україні відповідна установа розташована в Харкові).</p> <p>Абсолютні похибки деяких приладів, що використовують у школі, наведено в <u>табл. 2</u>. Якщо ви користуєтесь іншими приладами, то вважайте, що похибка приладу дорівнює <i>половині ціни поділки шкали цього приладу</i></p>
<p><i>Абсолютна похибка прямого вимірювання (Δx) враховує як систематичну похибку, зумовлену приладом ($\Delta x_{\text{прил}}$), так і випадкову похибку ($\Delta x_{\text{вип}}$), зумовлену процесом вимірювання:</i></p> $\Delta x = \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{вип}}$	

Таблиця 2. Абсолютні похибки деяких фізичних приладів

Фізичний прилад	Ціна поділки шкали приладу	Абсолютна похибка приладу
Лінійка учнівська	1 мм	± 1 мм
Стрічка вимірювальна	0,5 см	$\pm 0,5$ см
Штангенциркуль	0,1 мм	$\pm 0,05$ мм
Циліндр вимірювальний	1 мл	± 1 мл
Секундомір	0,2 с	± 1 с за 30 хв
Динамометр навчальний	0,1 Н	$\pm 0,05$ Н
Термометр лабораторний	1 °С	± 1 °С
Амперметр шкільний	0,1 А	$\pm 0,05$ А
Вольтметр шкільний	0,2 В	$\pm 0,1$ В

5 Як визначити похибки непрямих вимірювань

Багато фізичних величин неможливо виміряти безпосередньо. Їх *непряме* вимірювання має два етапи: 1) методом прямих вимірювань знаходять значення певних величин, наприклад x, y ; 2) за відповідною формулою обчислюють шукану величину f . Як у такому випадку визначити абсолютну Δf і відносну ε_f похибки? Відповідь на це дає теорія ймовірностей.

- Відносну похибку визначають за певними формулами (див. табл. 3).
- Абсолютну похибку визначають за відносною похибкою:

$$\Delta f = \varepsilon_f \cdot f_{\text{вим}}$$

- Якщо експеримент проводять, щоб з'ясувати, чи справджується певна рівність (наприклад, $X = Y$), то відносну похибку експериментальної перевірки рівності $X = Y$ можна обчислити за формулою:

$$\varepsilon = \left| \frac{X}{Y} - 1 \right| \cdot 100\%$$

6 Як правильно записати результати

Абсолютна похибка експерименту визначає точність, з якою є сенс обчислювати вимірювану величину.

Абсолютну похибку Δx округлюють до однієї значущої цифри із завищенням, а результат вимірювання $x_{\text{вим}}$ — до величини розряду, який залишився в абсолютній похибці після округлення. Остаточний результат x записують у вигляді:

$$x = x_{\text{вим}} \pm \Delta x$$

Абсолютна похибка — додатна величина, тому $x = x_{\text{вим}} + \Delta x$ — найбільше ймовірне значення, а $x = x_{\text{вим}} - \Delta x$ — найменше ймовірне значення вимірюваної величини (рис. 2.4).

Приклад. Нехай вимірювали прискорення вільного падіння (g). У результаті обробки одержаних експериментальних даних отримали:

$$g_{\text{вим}} = 9,736 \text{ м/с}^2; \Delta g = 0,123 \text{ м/с}^2.$$

Таблиця 3
Деякі формули для визначення відносної похибки

Вид формули (функції)	Відносна похибка
$f = x + y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = xy$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	
$f = x^n$	$\varepsilon_f = n\varepsilon_x$
$f = \sqrt[n]{x}$	$\varepsilon_f = \frac{1}{n}\varepsilon_x$

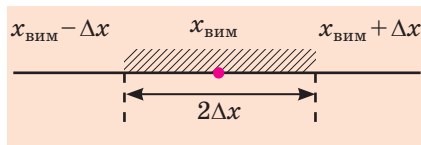


Рис. 2.4. Абсолютна похибка визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини

Абсолютну похибку потрібно округлити до однієї значущої цифри із завищенням: $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}^2$.

Тоді *результат вимірювання* округлюється до того ж розряду, що й розряд похибки, тобто до десятих: $g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$.

Відповідь за підсумками експерименту слід подати у вигляді: $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2$.

Відповідно *істинне значення* прискорення вільного падіння міститься в інтервалі від $9,5 \text{ м/с}^2$ до $9,9 \text{ м/с}^2$ (рис. 2.5).

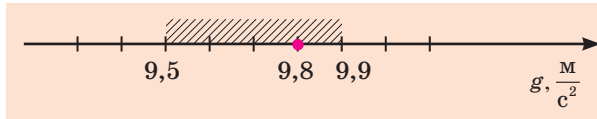


Рис. 2.5. Табличне значення: $g_{\text{табл}} = 9,8 \text{ м/с}^2$ належить до інтервалу $[9,5; 9,9] \text{ м/с}^2$, тому можна сказати, що *результат експерименту* ($g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$) збігся з *табличним* у межах похибки вимірювань



Підбиваємо підсумки

- Фізичне дослідження — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики. Існують два методи фізичних досліджень: теоретичні й експериментальні. В основі будь-якого теоретичного дослідження лежить ідеалізований об'єкт — фізична модель.

- Фізична величина є кількісною мірою певної властивості тіла, певного фізичного процесу або явища. Виміряти фізичну величину означає порівняти її з однорідною величиною, взятою за одиницю.

- У ході будь-якого вимірювання обов'язково є похибки: випадкові, пов'язані з процесом вимірювання, і систематичні, пов'язані з вибором приладу для вимірювання.

- Абсолютна похибка експерименту визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини, й обчислюється за формулою: $\Delta x = \Delta x_{\text{вим}} + \Delta x_{\text{прил}}$. Відносна похибка характеризує якість вимірювання, дорівнює відношенню абсолютної похибки до середнього значення вимірюваної величини і подається у відсотках: $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$.

Відносна похибка характеризує якість вимірювання, дорівнює відношенню абсолютної похибки до середнього значення вимірюваної величини і подається у відсотках: $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$.



Контрольні запитання

1. Назвіть основні методи фізичних досліджень. Наведіть приклади. **2.** Наведіть приклади фізичних моделей. Чому фізична модель — це ідеалізований об'єкт? **3.** Назвіть основні одиниці СІ та величини, для вимірювання яких вони слугують. **4.** Які види похибок вимірювань ви знаєте? **5.** Як визначити випадкову похибку вимірювання? **6.** Чим визначається абсолютна систематична похибка? **7.** Що називають відносною похибкою вимірювання? **8.** Як правильно округлити й записати результати вимірювань?



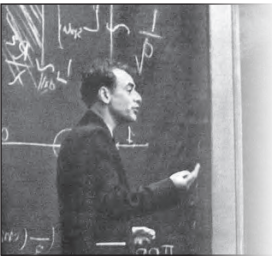
Вправа № 2

1. Щоб довести закон збереження механічної енергії, провели експеримент. Було отримано, що середня енергія системи тіл до взаємодії дорівнює 225 Дж, а після взаємодії — 243 Дж. Оцініть відносну похибку експерименту.

- Визначаючи діаметр дроту за допомогою штангенциркуля, вимірювання проводили чотири рази. Було одержано такі результати: $d_1 = 2,2$ мм; $d_2 = 2,1$ мм; $d_3 = 2,0$ мм; $d_4 = 2,0$ мм. 1) Обчисліть середнє значення діаметра дроту, випадкову похибку вимірювання, абсолютну та відносну похибки вимірювання. 2) Округліть одержані результати й запишіть результат вимірювання.
- Щоб визначити швидкість руху візка, провели експеримент. Пройдений шлях вимірювали рулеткою, а час — секундоміром із відносною систематичною похибкою 1 %. Вимірювання проводили п'ять разів. Показ рулетки щоразу був незмінним і дорівнював 1 м. У ході вимірювання часу одержано такі результати: $t_1 = 5,6$ с; $t_2 = 5,8$ с; $t_3 = t_4 = 5,3$ с; $t_5 = 5,5$ с. Обчисліть виміряне значення швидкості руху візка, відносну й абсолютну похибки вимірювання швидкості руху. Запишіть результат вимірювання.

i

§ 3. СКАЛЯРНІ ТА ВЕКТОРНІ ВЕЛИЧИНИ



Л. Д. Ландау (1908–1968),
лауреат Нобелівської
премії з фізики

До розуміння того, що для описування природи потрібно використовувати мову математики, учені прийшли давно. Власне, математика була створена для того, щоб описувати природу стисло й доступно мовою. Так з'явилася векторна алгебра, необхідна для теоретичних досліджень величин, що мають напрямок. Для визначення миттєвої швидкості, роботи змінної сили, об'єму тіл неправильної форми та ін. було створено диференціальне та інтегральне числення. Для наочнішого описання фізичних процесів навчилися будувати графіки функцій, а для швидкої обробки результатів експерименту придумали методи наближених обчислень. Згадаємо скалярні та векторні величини, без яких вам не обійтися в ході вивчення курсу фізики 10 класу.

1 Скалярні та векторні величини

Фізичні величини, які використовують у фізиці для кількісної характеристики фізичних явищ і об'єктів, поділяються на два великі класи: *скалярні величини* і *векторні величини*.

До *скалярних величин*, або *скалярів* (від латин. *scalaris* — східчастий), належать величини, які визначаються тільки значенням. Наприклад, маса тіла — скалярна величина, і якщо ми говоримо, що маса тіла дорівнює двом кілограмам ($m = 2$ кг), то повністю визначаємо цю величину. *Додати дві скалярні фізичні величини означає додати їхні значення, подані в однакових одиницях*. Зрозуміло, що додавати можна тільки однорідні скаляри (наприклад, не можна додавати масу до часу, а густину до роботи тощо).

Для визначення *векторних величин* важливо знати не тільки їх значення, але й напрямки. Вектор (від латин. *vector* — носій) — *це напрямлений відрізок, тобто відрізок, що має і довжину, і напрямок*. Довжину напрямленого відрізка називають *модулем вектора*. Позначають векторні величини літерами грецького та латинського алфавітів, над якими поставлено стрілки, або напівжирними літерами.

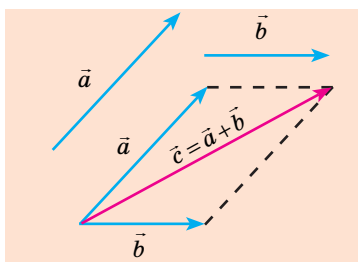


Рис. 3.1. Визначення суми двох векторів \vec{a} і \vec{b} за правилом паралелограма: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$

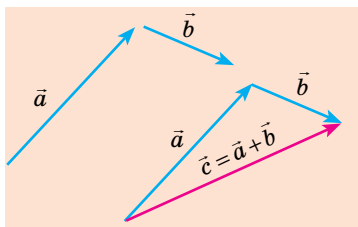


Рис. 3.2. Визначення суми двох векторів \vec{a} і \vec{b} за правилом трикутника: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$

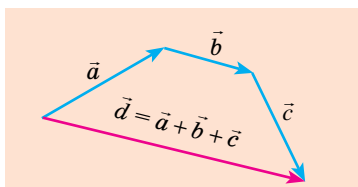


Рис. 3.3. Визначення суми трьох векторів \vec{a} , \vec{b} і \vec{c} : $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

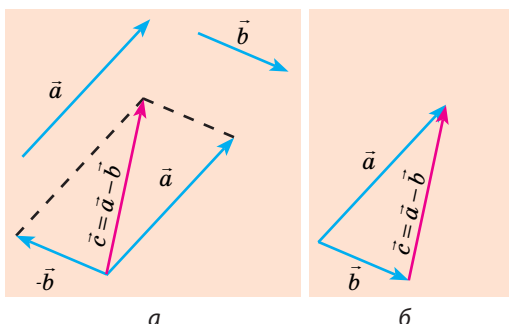


Рис. 3.4. Два способи визначення різниці двох векторів: а — до вектора \vec{a} додають вектор, протилежний вектору \vec{b} : $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{b})$, тобто $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$; б — вектори \vec{a} і \vec{b} розміщують так, щоб вони виходили з однієї точки, вектор \vec{c} , що з'єднає кінець вектора \vec{b} із кінцем вектора \vec{a} , і є вектор різниці векторів \vec{a} і \vec{b} , тобто $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$

Наприклад, швидкість записують так: \vec{v} або v ; модуль вектора швидкості відповідно позначають як v .

Правила додавання (віднімання) векторів відрізняються від правил додавання (віднімання) скалярних величин.

Суму двох векторів визначають за правилом паралелограма або правилом трикутника (рис. 3.1, 3.2).

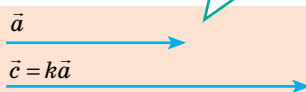
Як визначити суму кількох векторів, показано на рис. 3.3, як визначити різницю двох векторів, показано на рис. 3.4.

У результаті множення векторної величини \vec{a} на скалярну величину k виходить вектор \vec{c} (рис. 3.5).

Зверніть увагу! У фізиці модулі векторної та скалярної величин мають — крім числових значень — ще й одиниці, в яких вони вимірюються. Одиниця їх добутку визначається як добуток одиниці векторної величини на одиницю скалярної.

Наприклад, потрібно знайти переміщення літака, який протягом 0,5 год летить на північ зі швидкістю 500 км/год. Вектор переміщення: $\vec{s} = \vec{v}t$. Оскільки $t > 0$, то вектор переміщення \vec{s} буде напрямлений у той самий бік, що й вектор швидкості \vec{v} , а модуль вектора переміщення дорівнюватиме: $s = vt = 500 \text{ км/год} \cdot 0,5 \text{ год} = 250 \text{ км}$.

Якщо $k > 0$, вектори \vec{c} і \vec{a} співнаправлені



Якщо $k < 0$, вектори \vec{c} і \vec{a} напрямлені протилежно

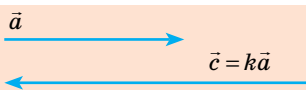


Рис. 3.5. Визначення добутку вектора \vec{a} на скаляр k : модуль вектора \vec{c} дорівнює добутку модуля скаляра і модуля вектора \vec{a} , тобто $c = |k|a$

2 Як знайти проєкції вектора на осі координат

Із векторами здійснювати математичні операції набагато складніше, ніж зі скалярами, тому в ході розв'язування задач від векторних фізичних величин переходять до їхніх проєкцій на осі координат.

Нехай вектор \vec{a} лежить у площині HOY (рис. 3.6). Опустимо з точки A (початок вектора \vec{a}) і точки B (кінець вектора \vec{a}) перпендикуляри на вісь OX . Основи цих перпендикулярів — точки A_1 і B_1 — це *проєкції точок A і B на вісь OX* , а відрізок A_1B_1 — *проєкція вектора \vec{a} на вісь OX* . Проєкцію вектора позначають тією самою літерою, що й вектор, із зазначенням у нижньому індексі осі, наприклад: a_x . Якщо із кінців вектора \vec{a} побудувати перпендикуляри до осі OY , дістанемо відрізок A_2B_2 — проєкцію вектора \vec{a} на вісь OY (a_y).

Проєкція вектора — величина скалярна, а її знак залежить від напрямків вектора й осі координат. Проєкція вектора на вісь координат вважається *додатною*, якщо від проєкції початку вектора до проєкції його кінця треба рухатися в напрямку осі координат; проєкція вектора вважається *від'ємною*, якщо від проєкції початку вектора до проєкції кінця вектора треба рухатися проти напрямку осі координат (див. рис. 3.6).

У загальному випадку проєкцію вектора визначають звичайними геометричними методами (рис. 3.7, а). На практиці часто доводиться мати справу з випадками, коли вектор паралельний осі координат або перпендикулярний до неї. Якщо вектор паралельний осі координат, а його напрямок збігається з напрямком осі, то його проєкція на цю вісь додатна й дорівнює модулю вектора (рис. 3.7, б). Якщо напрямок вектора протилежний напрямку осі координат, то його проєкція на цю вісь дорівнює модулю вектора, взятому з протилежним знаком (рис. 3.7, в). Якщо ж вектор перпендикулярний до осі координат, то його проєкція на цю вісь дорівнює нулю (рис. 3.7, г).

Дуже важливою властивістю проєкцій є те, що *проєкція суми двох векторів* (рис. 3.8)

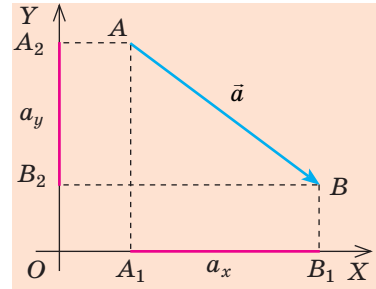


Рис. 3.6. Визначення проєкцій вектора на осі координат: a_x — проєкція вектора \vec{a} на вісь OX , $a_x > 0$; a_y — проєкція вектора \vec{a} на вісь OY , $a_y < 0$

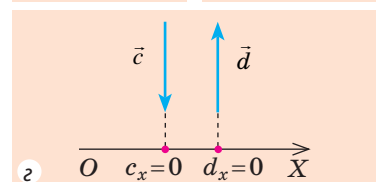
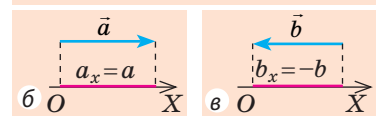
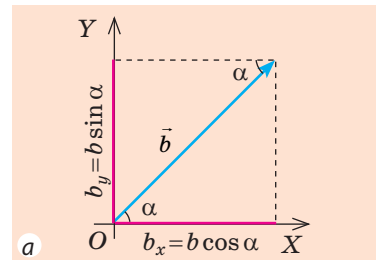


Рис. 3.7. Визначення проєкцій вектора на осі координат

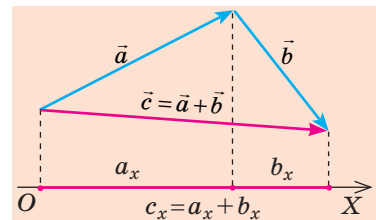


Рис. 3.8. Проєкція суми векторів дорівнює сумі проєкцій векторів, що додаються: якщо $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, то $c_x = a_x + b_x$

або кількох векторів на координатну вісь дорівнює алгебраїчній сумі проєкцій цих векторів на дану вісь. Саме ця властивість дозволяє замінювати в рівнянні векторні величини їх проєкціями — скалярними величинами і далі розв'язувати одержане рівняння звичайними алгебраїчними методами.

! Підбиваємо підсумки

- За своїми геометричними властивостями фізичні величини поділяються на скалярні та векторні.
- Додати дві скалярні величини означає додати їхні значення. Додавати можна скалярні величини, подані в одних одиницях.
- Векторні величини мають значення (модуль) і напрямок.
- Суму векторів визначають за правилом паралелограма або правилом трикутника.



Контрольні запитання

1. Які фізичні величини називають скалярними? векторними? Наведіть приклади.
2. Як знайти суму векторів? різницю векторів? добуток вектора та скаляра?
3. Як знайти проєкції вектора на осі координат?



Вправа № 3

1. Чи можна додавати площу й об'єм? вектор імпульсу й енергію? вектор швидкості та вектор сили? енергію та роботу? Чому?
2. Перенесіть у зошит рис. 1. Для кожного випадку знайдіть суму та різницю двох векторів.
3. Перенесіть у зошит рис. 2. Для кожного випадку знайдіть суму трьох векторів.

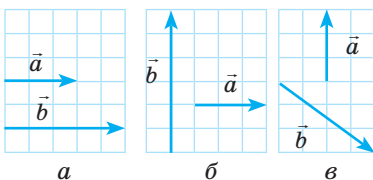


Рис. 1

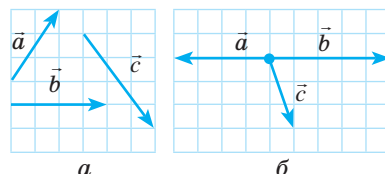


Рис. 2

4. Визначте проєкції векторів на осі координат (рис. 3).

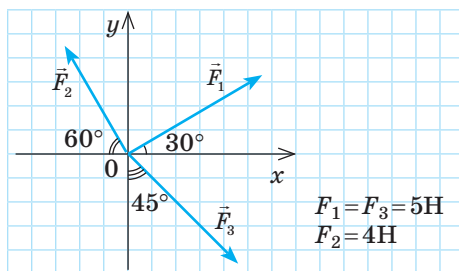
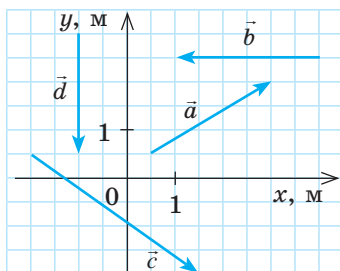


Рис. 3

Розділ I. **МЕХАНІКА**



КІНЕМАТИКА



ДИНАМІКА
І ЗАКОНИ
ЗБЕРЕЖЕННЯ



МЕХАНІЧНІ
КОЛИВАННЯ
І ХВИЛІ

ЧАСТИНА 1. КІНЕМАТИКА



§ 4. ОСНОВНА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ. АБЕТКА КІНЕМАТИКИ

Уявіть, що сталася аварійна ситуація, і на одній колії опинилися два поїзди: товарний рухається зі швидкістю 50 км/год, а позаду нього, на відстані 1 км, їде експрес зі швидкістю 70 км/год. Машиніст експреса починає гальмувати. Чи є неминучою катастрофа? Скільки часу потрібно експресу для зупинки? Який шлях подолає за цей час товарний поїзд? Яку найменшу відстань має подолати експрес до зупинки? Від чого це залежить? Згадаємо, що на ці та багато інших подібних запитань відповідає розділ фізики, який називають «Механіка».

1

Що вивчає механіка

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

Основна задача механіки — пізнати закони механічного руху тіл, взаємодій між тілами, передбачати поведінку тіл на основі законів механіки, визначати механічний стан тіла (координати та швидкість руху) в будь-який момент часу (див., наприклад, [рис. 4.1](#)).

Механіка у своєму складі має кілька розділів, зокрема **кінематику** — розділ механіки, який вивчає рух тіл і при цьому не розглядає причин, якими цей рух викликаний. Інакше кажучи, кінематика не відповідає на запитання на зразок: «Чому потрібно саме 2 км, щоб зупинити експрес?», — вона займається тільки описанням руху. А от причини зміни руху тіл розглядають у розділі механіки, який називається **динаміка**.



На які запитання з поставлених на початку параграфу може відповісти кінематика? динаміка?

2

Складові системи відліку

Механічний рух — зміна з часом положення тіла (або частин тіла) в просторі відносно інших тіл.

Тіло, відносно якого розглядають рух усіх інших тіл, про які йдеться в певній задачі, називають *тілом відліку*. Щоб визначити положення тіла в просторі в даний момент часу, з тілом відліку пов'язують *систему координат*, яку задають за допомогою однієї, двох або трьох координатних осей (відповідно одновимірну, двовимірну або тривимірну систему координат), і *прилад для відліку часу* (годинник, секундомір тощо).

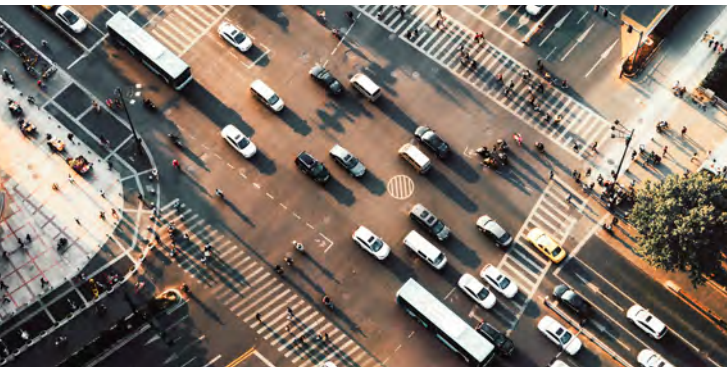


Рис. 4.1. На перехресті не відбулося жодної дорожньо-транспортної пригоди, оскільки всі учасники руху правильно розв'язали основну задачу механіки

Тіло відліку, пов'язані з ним система координат і прилад для відліку часу утворюють **систему відліку** (див. рис. 4.2).

Доки не обрано систему відліку, неможливо стверджувати, рухається тіло чи перебуває в стані спокою. Наприклад, люди, що сидять в тролейбусі, не рухаються відносно одне одного, але разом із тролейбусом вони рухаються відносно полотна дороги.

? Розгляньте рис. 4.2. Назвіть тіла або частини тіл, які здійснюють механічний рух. Відносно яких тіл ви розглядали ці рухи?

3 Коли розмірами тіла можна знехтувати

Будь-яке фізичне тіло складається з величезної кількості частинок. Наприклад, в 1 см^3 заліза міститься понад 10^{23} атомів. Це в багато разів більше, ніж кількість людей на Землі ($7,6 \cdot 10^9$, або 7,6 млрд осіб). А щоб визначити розташування тіла в просторі, потрібно, суворо кажучи, визначити розташування кожної його точки. Тож як розв'язати основну задачу механіки? З попереднього курсу фізики ви знаєте, що, описуючи рух тіла, розміри якого набагато менші від відстані, яку воно долає, тіло замінюють його фізичною моделлю — *матеріальною точкою*. Матеріальна точка не має розмірів, а її маса дорівнює масі тіла.



Рис. 4.2. Складові системи відліку: тіло відліку, система координат і прилад для відліку часу

Матеріальна точка — це фізична модель тіла, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати.

Те саме тіло в умовах однієї задачі можна вважати матеріальною точкою, а в умовах іншої — не можна (див. [рис. 4.3](#)). Далі, якщо не буде спеціальних застережень, розглядаючи рух тіла та визначаючи його координати, вважатимемо дане тіло матеріальною точкою.

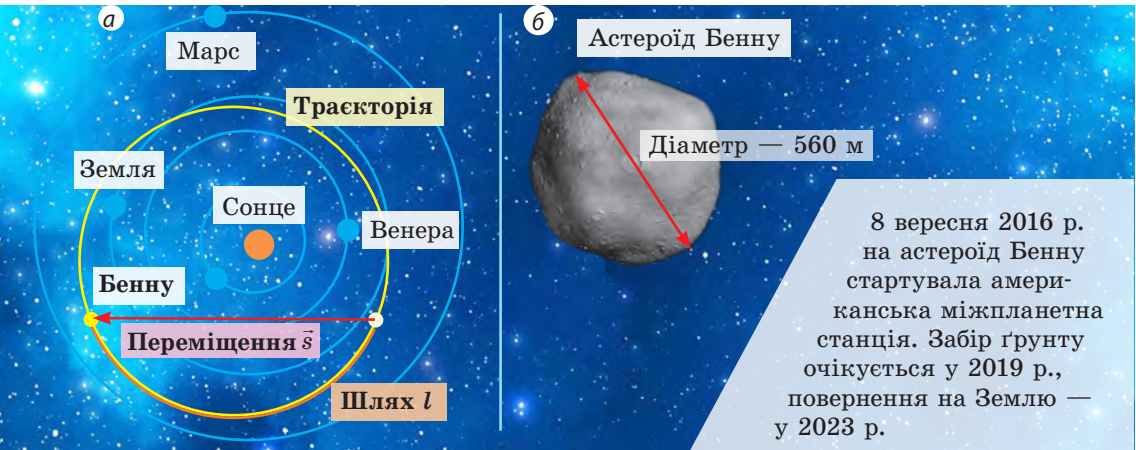


Рис. 4.3. Досліджуючи рух астероїда Бенну по орбіті, розміром астероїда можна знехтувати та вважати його матеріальною точкою (а); плануючи спуск на астероїд робота, розмірами астероїда нехтувати не можна (б)

Уявну лінію, в кожній точці якої послідовно перебувала матеріальна точка під час руху, називають **траєкторією руху**. Наприклад, траєкторією руху астероїда Бенну є еліпс (жовта лінія на [рис. 4.3, а](#)).

Якщо визначити довжину ділянки траєкторії, яку описав астероїд, наприклад, за три земних місяці, знайдемо шлях l , який подолав астероїд за цей час ($l \approx 262$ млн км) (оранжево-жовта лінія на [рис. 4.3, а](#)). **Шлях** — це фізична величина, яка дорівнює довжині траєкторії або довжині її певної ділянки.

4 Переміщення. Проекція переміщення

З'єднаємо напрямленим відрізком (вектором) положення астероїда на момент початку спостереження з його положенням наприкінці спостереження (див. [рис. 4.3](#)). Цей вектор — переміщення астероїда за даний інтервал часу.

Переміщення \vec{s} — це векторна величина, яку графічно подають у вигляді напрямленого відрізка прямої, який з'єднує початкове та кінцеве положення матеріальної точки.

Переміщення вважають заданим, якщо відомі *напрямок* і *модуль переміщення*. Модуль переміщення s — це довжина вектора переміщення. **Одиниця модуля переміщення в СІ — метр:**

$$[s] = 1 \text{ м (м)}^*.$$

* Тут і далі в дужках наведено міжнародні позначення одиниць СІ.

Вектор переміщення в загальному випадку не збігається з траєкторією руху тіла: шлях, пройдений тілом, зазвичай більший, ніж модуль переміщення (див. рис. 4.3, 4.5). Шлях і модуль переміщення виявляються рівними тільки коли тіло рухається вздовж прямої в незмінному напрямку.

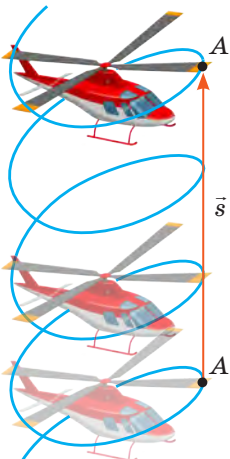
- ❓ Наведіть приклади руху тіл, коли: а) шлях дорівнює модулю переміщення; б) шлях є більшим за модуль переміщення; в) модуль переміщення дорівнює нулю.

Якщо відомі переміщення та початкові координати тіла, то можна визначити положення тіла в будь-який момент часу, тобто *розв'язати основну задачу механіки*. Однак за формулами, записаними у векторному вигляді, здійснювати обчислення доволі складно, адже в цьому випадку доводиться постійно враховувати напрямки векторів. Тому для розв'язання задач використовують *проекції вектора переміщення на осі координат* (рис. 4.4).

5 У чому полягає відносність механічного руху

Траєкторія, шлях, переміщення, а отже, швидкість руху тіла залежать від вибору системи відліку — в цьому полягає відносність механічного руху.

- ❓ Переконайтеся у відносності механічного руху: розгляньте рух точки А на лопаті гвинта гелікоптера під час його вертикального зльоту, прийнявши, що за час спостереження гвинт гелікоптера зробив три оберти (рис. 4.5).



Система відліку «Гелікоптер»:

- траєкторія руху точки А — коло;
- шлях l — три довжини кола: $l = 3 \cdot 2\pi R$;
- модуль переміщення $s = 0$.

Система відліку «Земля»:

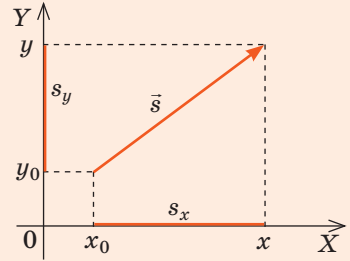
- траєкторія руху точки А — гвинтова лінія;
- шлях l — довжина гвинтової лінії;
- модуль переміщення s — висота, на яку піднявся гелікоптер: $s = h$.

Рис. 4.5. Траєкторія, шлях і переміщення гелікоптера в різних системах відліку

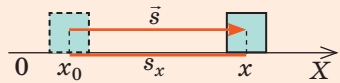
Координати тіла, проекції переміщення

- У будь-який момент часу координати тіла можна визначити за формулами:

$$x = x_0 + s_x; \quad y = y_0 + s_y$$



- $s_x = s$, якщо напрямок переміщення збігається з напрямком осі координат



- $s_x = -s$, якщо напрямок переміщення протилежний напрямку осі координат

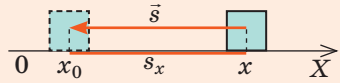


Рис. 4.4. Координатний метод знаходження положення тіла



Нам здається очевидним, що час руху тіла не залежить від вибору СВ. Тобто *інтервал часу між двома даними подіями в усіх системах відліку має те саме значення*. Це твердження — одна з найважливіших аксіом класичної механіки. І це дійсно так, але тільки тоді, коли швидкість руху тіла є набагато меншою за швидкість поширення світла (рух саме з такими швидкостями розглядають у *класичній механіці*).

Якщо швидкість руху тіла порівнянна зі швидкістю поширення світла, то час для цього тіла сповільнюється.

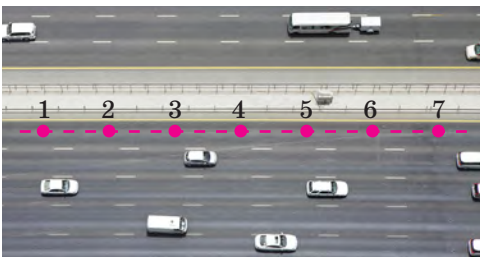
6 Згадуємо види механічного руху

Ви знаєте, що за *характером руху* розрізняють *рівномірний* і *нерівномірний* рухи, за *формою траєкторії* — *прямолінійний* і *криволінійний* рухи.

Уважно розгляньте таблицю та дайте означення деяких механічних рухів: рівномірного прямолінійного, рівномірного криволінійного, нерівномірного прямолінійного, нерівномірного криволінійного. Наведіть власні приклади таких рухів. (Червоні точки в таблиці показують положення тіла через деякі рівні інтервали часу.)

Рівномірний рух — рух, під час якого матеріальна точка за будь-які рівні інтервали часу долає однаковий шлях

Прямолінійний рух
Траєкторія руху — пряма лінія

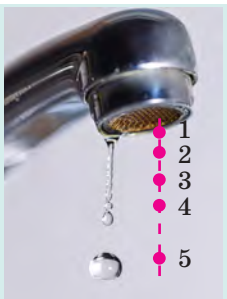


Криволінійний рух
Траєкторія руху — крива лінія



Нерівномірний рух — рух, під час якого матеріальна точка за рівні інтервали часу долає різний шлях

Прямолінійний рух
Траєкторія руху — пряма лінія



Криволінійний рух
Траєкторія руху — крива лінія





Підбиваємо підсумки

- Механіка — наука про механічний рух матеріальних тіл і про взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами. Основна задача механіки — пізнати закони руху та взаємодії матеріальних тіл, на основі цих законів передбачати поведінку тіл та визначати механічний стан тіл у будь-який момент часу.
- Механічний рух — зміна з часом положення тіла (або частин тіла) в просторі відносно інших тіл. Розв'язуючи задачу про механічний рух, обов'язково слід обрати систему відліку: тіло відліку, пов'язані з ним систему координат і прилад для відліку часу.
- Матеріальна точка — це фізична модель тіла, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати. Маса матеріальної точки збігається з масою тіла. Лінію руху матеріальної точки в просторі називають траєкторією. Координати матеріальної точки у двовимірній системі координат обчислюють за формулами: $x = x_0 + s_x$; $y = y_0 + s_y$.
- Шлях l — це фізична величина, що чисельно дорівнює довжині траєкторії матеріальної точки за даний інтервал часу.

Переміщення \vec{s} — це векторна величина, яку графічно подають у вигляді напрямленого відрізка прямої, проведеного із початкового положення матеріальної точки до її кінцевого положення.

Одиниця шляху та модуля переміщення в СІ — метр (м).
- Траєкторія руху, шлях і переміщення тіла залежать від вибору системи відліку — в цьому полягає відносність механічного руху.



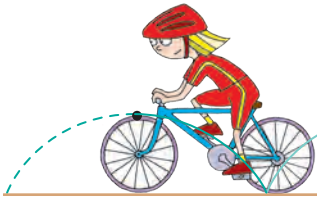
Контрольні запитання

1. Що вивчає механіка?
2. Якою є основна задача механіки?
3. Дайте означення механічного руху.
4. Наведіть приклади різних механічних рухів.
5. Назвіть складові системи відліку.
6. Які види систем координат ви знаєте?
7. У яких випадках тіло, що рухається, можна розглядати як матеріальну точку? Наведіть приклад.
8. опишіть шлях і переміщення за планом характеристики фізичної величини (див. форзац підручника).
9. У чому полягає відносність механічного руху? Наведіть приклад.
10. Чия професійна діяльність пов'язана з темою параграфа?



Вправа № 4

1. Яку систему координат (одновимірну, двовимірну, тривимірну) ви оберете, описуючи такі рухи: підйом ліфта; рух човна по поверхні води; біг футболіста на полі; політ метелика; катання на роликах; спуск з гори на лижах?
2. Зараз ви сидите за столом, читаете підручник. Назвіть декілька тіл відліку, відносно яких ви рухаєтесь. У якому напрямку відбувається цей рух?
3. З яким тілом потрібно пов'язати систему відліку, щоб ваші шлях і переміщення в будь-який момент часу дорівнювали нулю? Чи зручною буде ця система відліку для опису вашого руху?
4. Автомобіль рухається на повороті дороги, який являє собою чверть дуги кола радіуса 20 м. Визначте шлях і модуль переміщення автомобіля за час повороту.
5. Із повітряної кулі, що летить горизонтально, впав невеликий важкий предмет. Якою буде траєкторія руху цього предмета відносно кулі? відносно людини, яка спостерігає за рухом кулі, сидячи на галявині?



6. Траєкторія руху точки на ободі колеса велосипеда відносно землі є *циклоїдою* (див. рисунок). Вважають, що властивості циклоїди першим дослідив Г. Галілей. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про «механічні» властивості цієї лінії.



Експериментальне завдання

Скориставшись мобільним пристроєм і відповідною програмою, прокладіть траєкторію руху від вибраного вами будинку до школи. Визначте шлях, який ви при цьому долаєте, напрямок і модуль переміщення.



§ 5. ШВИДКІСТЬ РУХУ. СЕРЕДНЯ ТА МИТТЄВА ШВИДКОСТІ. ЗАКОНИ ДОДАВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ І ШВИДКОСТЕЙ



Чи перепливали ви річку зі швидкою течією? Дуже важко перепливати її так, щоб потрапити на протилежний берег прямо навпроти місця запливу. А хтось намагався піднятися ескалатором, що рухається вниз? Теж складно. Набагато швидше піднятися, якщо рухатися в бік руху ескалатора. У кожному з наведених прикладів людина бере участь водночас у двох рухах. Як при цьому розрахувати швидкість її руху, ви дізнаєтесь із цього параграфа. Але спочатку згадаємо, що таке швидкість.

1 Згадаємо рівномірний прямолінійний рух тіла

Найпростіший вид механічного руху — *рівномірний прямолінійний рух*.

Рівномірний прямолінійний рух — це такий механічний рух, під час якого тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.

З означення рівномірного прямолінійного руху випливає:

- для опису цього руху достатньо скористатись одновимірною системою координат, адже траєкторія руху — пряма;
- відношення переміщення \vec{s} до інтервалу часу t , за який це переміщення відбулося, для такого руху є незмінною величиною, адже за рівні інтервали часу тіло здійснює однакові переміщення.

Векторну фізичну величину, яка дорівнює відношенню переміщення \vec{s} до інтервалу часу t , за який це переміщення відбулося, називають **швидкістю рівномірного прямолінійного руху тіла**:

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

Напрямок вектора швидкості руху збігається з напрямком переміщення тіла, а модуль і проекцію швидкості визначають за формулами:

$$v = \frac{s}{t} ; \quad v_x = \frac{s_x}{t}$$

Одиниця швидкості руху в СІ — метр за секунду:

$$[v] = 1 \text{ м/с (m/s)}.$$

Із формули для визначення швидкості руху тіла можна знайти переміщення тіла за будь-який інтервал часу:

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

Останню формулу будемо записувати для проєкцій: $s_x = v_x t$ або для модулів: $s = vt$. Оскільки в даному випадку швидкість руху тіла не змінюється з часом, то переміщення, яке здійснює тіло, прямо пропорційне часу:

$$s \sim t; \quad s_x \sim t.$$

Для розв'язання основної задачі механіки — визначення механічного стану тіла в будь-який момент часу — запишемо рівняння координати. Оскільки $x = x_0 + s_x$, а $s_x = v_x t$, то для рівномірного прямолінійного руху рівняння координати має вигляд:

$$x = x_0 + v_x t,$$

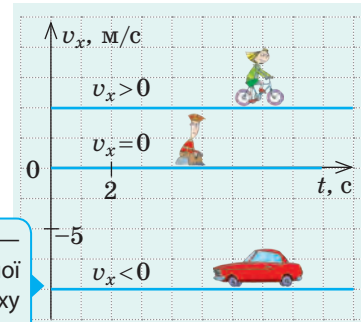
де x_0 — початкова координата; v_x — проєкція швидкості руху тіла; t — час спостереження.

Для описання руху зручно використовувати графіки (рис. 5.1) — вони так само повно описують рух тіл, як і відповідні формули або словесний опис.

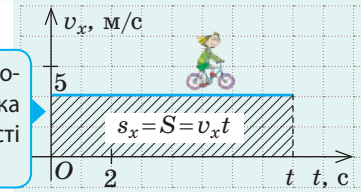
? Розгляньте рис. 5.1. З якою швидкістю рухається автомобіль? велосипед? Яким буде їх переміщення за 4 с спостереження? Визначте координату автомобіля через 8 с спостереження. На якій відстані один від одного перебуватимуть автомобіль і велосипед через 4 с спостереження?

2 Яку швидкість показує спідометр

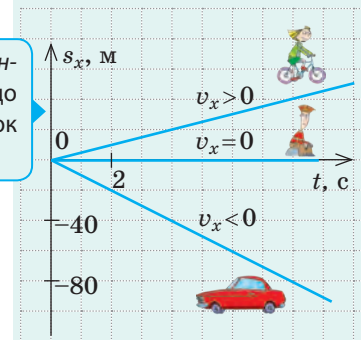
Ви вже знаєте, що для характеристики нерівномірного руху використовують фізичні величини: середня шляхова швидкість, середня векторна швидкість, миттєва швидкість (див. таблицю на с. 32).



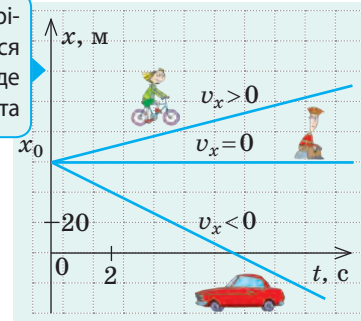
Графік проєкції швидкості — відрізок прямої, паралельної осі часу, адже швидкість руху не змінюється з часом



Переміщення чисельно дорівнює площі прямокутника під графіком залежності $v_x(t)$



Графік проєкції переміщення — відрізок прямої, що проходить через початок координат, оскільки $s_x \sim t$



Графік координати — відрізок прямої, що починається в точці $(t = 0; x = x_0)$, де x_0 — початкова координата

Рис. 5.1. Графіки рівномірного прямолінійного руху. Велосипед і автомобіль рухаються вздовж осі OX : велосипед — у напрямку осі OX , автомобіль — у протилежному напрямку. Турист сидить на узбіччі

Характеристика середньої шляхової, середньої векторної,

Середня шляхова швидкість

Скалярна фізична величина

Дорівнює відношенню всього шляху l до інтервалу часу t , за який цей шлях подолано

$$v_{\text{сер}} = \frac{l}{t} \quad \frac{\text{Увесь шлях}}{\text{Увесь час спостереження}}$$

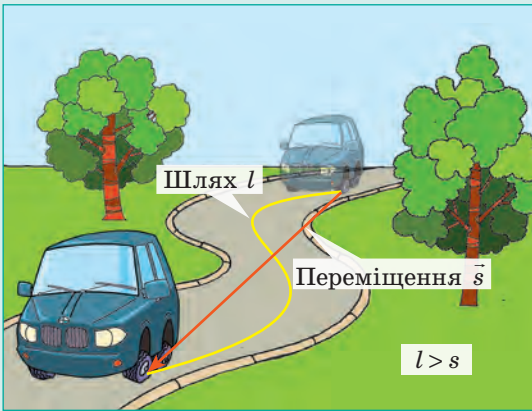
Не має напрямку

Середня векторна швидкість

Векторна фізична величина

Дорівнює відношенню переміщення \vec{s} до інтервалу часу t , за який це переміщення здійснено

$$\vec{v}_{\text{сер}} = \frac{\vec{s}}{t} \quad \frac{\text{Усе переміщення}}{\text{Увесь час спостереження}}$$

Напрямок збігається з напрямком переміщення: $\vec{v}_{\text{сер}} \uparrow \vec{s}$ 

Знання середньої швидкості не дозволяє описати весь рух. Наприклад, з міркувань безпеки в містах України встановлено середню швидкість руху транспортних засобів 50 км/год. Зрозуміло, що таке обмеження стосується середньої швидкості, виміряної за малий інтервал часу. Адже якщо людина за кермом 30 хв мчить зі швидкістю 80 км/год, а наступні 30 хв «повзе» зі швидкістю 20 км/год, її середня швидкість не перевищує 50 км/год, разом із цим рух автомобіля навряд чи можна вважати безпечним.

Далі, говорячи про швидкість руху тіла, матимемо на увазі його миттєву швидкість.

Під час прямолінійного рівномірного руху миттєва швидкість увесь час залишається незмінною та збігається із середньою швидкістю руху тіла. У будь-якому іншому випадку миттєва швидкість руху тіла змінюється: за напрямком — під час криволінійного рівномірного руху; за значенням, інколи — за напрямком (напрямок може змінюватися на протилежний) — під час прямолінійного нерівномірного руху; за напрямком і значенням водночас — під час криволінійного нерівномірного руху.

? Яку швидкість руху показує спідометр: середню векторну? середню шляхову? миттєву?

3

Як визначити швидкість руху тіла відносно різних систем відліку

Розглянемо рух тіла в різних системах відліку (СВ). Нехай таким тілом буде собака, який рухається рівномірно прямолінійно по плоту, що пливе річкою (рис. 5.2). Очевидно, що швидкість руху плоту дорівнює швидкості течії річки. За рухом собаки стежать два спостерігачі, один із яких (рибалка)

миттєвої швидкостей

Миттєва швидкість

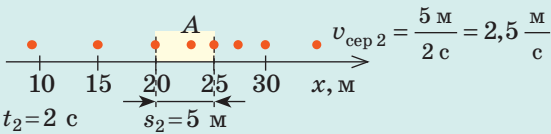
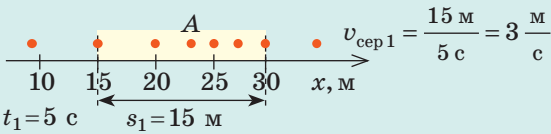
Векторна фізична величина

Швидкість руху в даний момент часу, в даній точці; середня векторна швидкість, виміряна за нескінченно малий інтервал часу

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} \quad \Delta \vec{s} \text{ — переміщення за дуже малий інтервал часу } \Delta t \ (\Delta t \rightarrow 0)$$

Напрямок збігається з напрямком переміщення в даний момент часу: $\vec{v} \uparrow \uparrow \Delta \vec{s}$

Чим менше інтервал часу, за який вимірюється середня швидкість руху, тим більше її значення наближається до значення миттєвої швидкості (на рисуноках нижче — в точці А)



Час між послідовними положеннями тіла — 1 с.

перебуває на березі, другий (господар собаки) — на плоту. Обидва спостерігачі вимірюють переміщення собаки та час його руху. Час руху собаки для обох спостерігачів однаковий, а от переміщення відрізнятимуться. Припустимо, що за якийсь час t собака перебіг на інший край плоту.

Переміщення \vec{s}_1 , яке здійснив собака відносно плоту (і яке виміряв господар собаки), дорівнює за модулем ширині плоту і напрямлене перпендикулярно до течії річки.

Переміщення \vec{s} , здійснене собакою відносно берега (і яке виміряв рибалка), дорівнює за модулем довжині відрізка OA і напрямлене під певним кутом до течії річки.

Власне пліт за цей час змістився за течією і здійснив переміщення \vec{s}_2 відносно берега.

З рис. 5.2 бачимо: $\vec{s} = \vec{s}_2 + \vec{s}_1$. Пов'яжемо з берегом систему координат XOY — отримаємо *нерухому систему відліку*. Із плотом пов'яжемо систему координат $X'O'Y'$ — отримаємо *рухому систему відліку*.

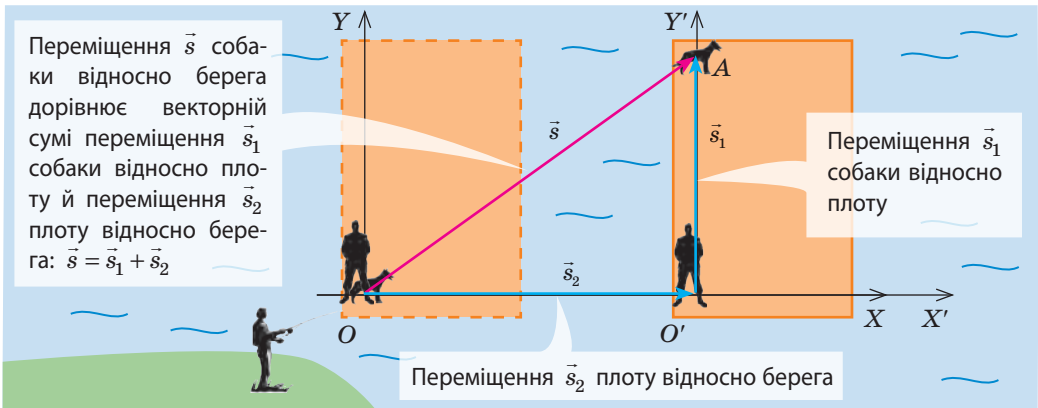


Рис. 5.2. До виведення закону додавання переміщень і швидкостей

Тепер можна сформулювати **закон додавання переміщень**:

Переміщення \vec{s} тіла в нерухомій системі відліку дорівнює геометричній сумі переміщення \vec{s}_1 тіла в рухомій системі відліку та переміщення \vec{s}_2 рухомої системи відліку відносно нерухомої:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

Поділивши обидві частини рівняння на час руху, маємо: $\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}$.

Відповідно до означення швидкості руху тіла: $\vec{s}/t = \vec{v}$ — швидкість руху тіла в нерухомій СВ; $\vec{s}_1/t = \vec{v}_1$ — швидкість руху тіла в рухомій СВ; $\vec{s}_2/t = \vec{v}_2$ — швидкість руху рухомої СВ відносно нерухомої СВ. Тобто $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$. Отже, формулюємо **закон додавання швидкостей**:

Швидкість \vec{v} руху тіла в нерухомій системі відліку дорівнює геометричній сумі швидкості \vec{v}_1 руху тіла в рухомій системі відліку та швидкості \vec{v}_2 руху рухомої системи відліку відносно нерухомої:

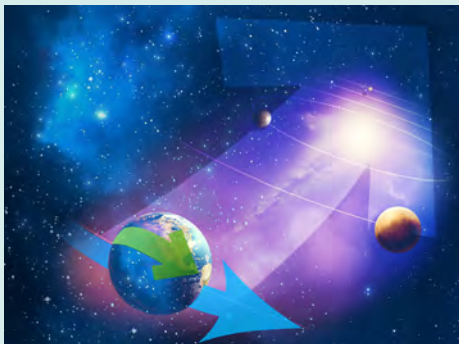
$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

Зверніть увагу! Оскільки рух і спокій є відносними, то в наведеному вище прикладі як нерухому СВ можна було обрати й СВ, пов'язану з плотом. У такому разі СВ, пов'язана з берегом, була б рухомою, а напрямок її руху був би протилежним напрямку течії.

4 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Рибалка перепливає річку на човні, утримуючи його перпендикулярно до напрямку течії. Швидкість v_1 руху човна відносно води — 4 м/с, швидкість v_2 течії річки — 3 м/с, ширина l річки — 400 м. Визначте: 1) за який час t човен перепливе річку; 2) за який час t_1 човен перепливав би річку, якби не було течії; 3) модуль переміщення s і модуль швидкості v руху човна відносно берега; 4) на якій відстані s_2 униз за течією від вихідної точки човен досягне протилежного берега.

Аналіз фізичної проблеми. Як нерухому візьмемо СВ, пов'язану із Землею, як рухому — СВ, пов'язану з водою. Виконаємо пояснювальний



Фізика в цифрах

- 1600 км/год — швидкість обертання Землі навколо своєї осі. З такою швидкістю рухається кожен предмет, розташований на екваторі.
- Понад 110 000 км/год — швидкість руху Землі навколо Сонця, а отже, й усіх нас.
- 2 млн км/год — швидкість, з якою Сонце і Сонячна система (а отже, усі ми) летять у космічному просторі.

Тож з якою швидкістю ми рухаємось? Єдиної відповіді немає — все залежить від системи відліку!

рисунок, на якому зобразимо вектори швидкості: руху човна відносно берега (\vec{v}), руху човна відносно води (\vec{v}_1), течії річки (\vec{v}_2).

Дано:

$$v_1 = 4 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 3 \text{ м/с}$$

$$l = 400 \text{ м}$$

$$t - ?$$

$$t_1 - ?$$

$$s - ?$$

$$v - ?$$

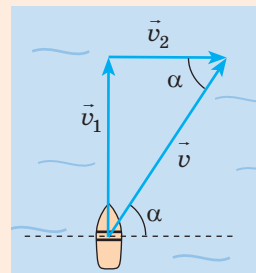
$$s_2 - ?$$

Розв'язання

1) У СВ, пов'язаній із водою, човен рухався зі швидкістю $v_1 = \frac{s_1}{t}$ і при цьому подолав відстань, яка дорівнює ширині річки: $s = l$.

Отже, час руху човна: $t = \frac{l}{v_1}$; $t = \frac{400 \text{ м}}{4 \text{ м/с}} = 100 \text{ с}$.

2) Бачимо, що час руху човна не залежить від швидкості течії річки, тому, якби не було течії, переїзд через річку зайняв би стільки ж часу: $t_1 = t = 100 \text{ с}$.



3) Модуль швидкості v руху човна відносно берега знайдемо за теоремою Піфагора:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}; \quad v = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ (м/с)}.$$

Човен рухається рівномірно, тому переміщення s човна відносно берега:

$$s = vt; \quad s = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 500 \text{ м}.$$

4) Знаючи час t руху човна та швидкість v_2 течії річки, визначимо відстань s_2 , на яку човен знесло вниз за течією: $s_2 = v_2 t$; $s_2 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 300 \text{ м}$.

Відповідь: $t = t_1 = 1 \text{ хв } 40 \text{ с}$; $s = 500 \text{ м}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $s_2 = 300 \text{ м}$.



Підбиваємо підсумки

- Рівномірний прямолінійний рух — це механічний рух, під час якого тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.
- Швидкість \vec{v} рівномірного прямолінійного руху — векторна фізична величина, яка дорівнює відношенню переміщення \vec{s} тіла до часу t , за який це переміщення відбулося: $\vec{v} = \vec{s} / t$.
- У випадку рівномірного прямолінійного руху:
 - графік залежності $v_x(t)$ — відрізок прямої, паралельної осі часу;
 - проекцію переміщення тіла можна обчислити за формулою: $s_x = v_x t$; графік залежності $s_x(t)$ — відрізок прямої, який починається в початку координат;
 - рівняння координати має вигляд: $x = x_0 + v_x t$.
- Якщо рух тіла не є рівномірним, для його опису використовують поняття:
 - середня векторна швидкість руху тіла: $\vec{v}_{\text{сеп}} = \vec{s} / t$;
 - середня шляхова швидкість руху тіла: $v_{\text{сеп}} = l / t$;
 - миттєва швидкість \vec{v} руху тіла — середня векторна швидкість за нескінченно малим інтервалом часу; швидкість руху в даний момент часу; швидкість руху в даний точці: $v = \Delta \vec{s} / \Delta t$ ($\Delta t \rightarrow 0$).
- Швидкість \vec{v} руху тіла в нерухомій СВ дорівнює геометричній сумі швидкості \vec{v}_1 руху тіла в рухомій СВ і швидкості \vec{v}_2 рухомої СВ відносно нерухомої СВ: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.



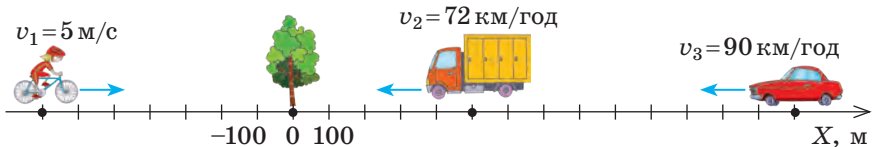
Контрольні запитання

1. Який рух називають рівномірним прямолінійним? **2.** Дайте характеристику швидкості рівномірного прямолінійного руху. **3.** Як визначити переміщення та координату тіла, що рухається рівномірно прямолінійно? **4.** Який вигляд мають графіки залежності $v_x(t)$; $s_x(t)$; $x(t)$ у випадку прямолінійного рівномірного руху? **5.** Дайте означення середньої векторної швидкості руху, середньої шляхової швидкості руху, миттєвої швидкості руху. **6.** Сформулюйте закон додавання переміщень і закон додавання швидкостей.



Вправа № 5

- Моторний човен рухається зі швидкістю 10 м/с відносно води. Швидкість течії річки — 1 м/с. Визначте швидкість руху моторного човна відносно берега річки під час його руху за течією; проти течії.
- Крилата насінина набуває незмінної швидкості падіння 0,3 м/с практично відразу після початку падіння з верхівки дерева. На якій відстані від прикореневої частини стовбура впаде насінина, якщо швидкість вітру спрямована горизонтально та дорівнює 1 м/с, а висота дерева становить 50 м? Яким є переміщення насінини відносно поверхні Землі?
- Кінь рухається ареною цирку по дузі кола радіуса 6 м, описуючи при цьому траєкторію, що являє собою половину кола. Першу чверть кола кінь долає за 10 с, а другу чверть — за 20 с. Визначте середню шляхову та середню векторну швидкості руху коня на кожній ділянці траєкторії та протягом всього часу руху.
- Запишіть рівняння руху для кожного транспортного засобу на рисунку. Визначте час і місце зустрічі вантажівки та велосипедиста, легкового автомобіля та велосипедиста. Де і коли легковий автомобіль обжене вантажівку? Побудуйте графіки залежності $v_x(t)$ і $x(t)$ для кожного тіла.



- Літак має долетіти до міста, розташованого на відстані 600 км на північ. Із заходу дме вітер зі швидкістю 40 км/год. Літак летить зі швидкістю 300 км/год відносно повітря. Яким курсом має летіти літак? Скільки часу триватиме рейс?
- Перед відправленням потяга йшов дощ. Вітру не було, і краплі дощу падали вертикально. Коли потяг рушив, пасажир помітив, що дощ став косим, хоча погода залишалася безвітряною. Поясніть це явище. Визначте швидкість падіння крапель, якщо під час руху потяга зі швидкістю 40 км/год пасажирам здається, що краплі падають під кутом 45° до вертикалі.
- Дізнайтеся про «рекордсменів швидкості» в сучасній техніці та в живій природі. Підготуйте повідомлення або презентацію.



§ 6. РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. ПРИСКОРЕННЯ



Існують автомобілі — драгстери, які мають потужність більшу, ніж літак «Боїнг». Уявляєте, яку швидкість драгстер може розвинути за дуже короткий час? Ось показники одного з драгстерів: за 0,5 с він розвинув швидкість 32 м/с, за 1,0 с — 51 м/с, за 3,8 с — 143 м/с! Яку відстань, на вашу думку, подолав драгстер за 3,8 с, якщо припустити, що кожного з розглянутих інтервалів часу він рухався рівноприскорено?

1 Згадуємо рівноприскорений прямолінійний рух тіла

Якщо тіло рухається нерівномірно, швидкість його руху безперервно змінюється. Напротішим із нерівномірних рухів є *рівноприскорений прямолінійний рух*.

Прямолінійний рух, під час якого швидкість руху тіла за будь-які рівні інтервали часу змінюється однаково, називають **рівноприскореним прямолінійним рухом**:

$$\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \text{const}$$

Із курсу фізики 9 класу ви знаєте, що рівноприскорений прямолінійний рух — це *рух із незмінним прискоренням*.

Прискорення \vec{a} — це векторна фізична величина, яка характеризує швидкість зміни швидкості руху тіла й дорівнює відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, за який ця зміна відбулася:

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

де \vec{v}_0 — початкова швидкість руху тіла (в момент початку відліку часу); \vec{v} — швидкість руху тіла через деякий інтервал часу t .

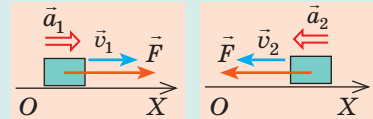
Ми використовуватимемо дану формулу, записану в проекціях на вісь координат, наприклад на вісь OX :

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

Одиниця прискорення в СІ — метр на секунду в квадраті: $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \left(1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)$.

• *Напрямок прискорення руху тіла збігається з напрямком рівнодійної сил, які діють на тіло (див. рис. 6.1).*

Якщо прискорення напрямлене в бік руху тіла, швидкість руху тіла збільшується (рівнодійна \vec{F} «підштовхує» та розганяє тіло).



Якщо прискорення напрямлене протилежно до руху тіла, швидкість руху тіла зменшується (рівнодійна \vec{F} «заважає» рухові та сповільнює його).

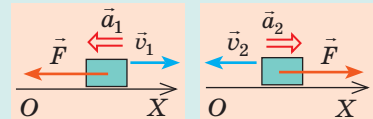


Рис. 6.1. Збільшення або зменшення швидкості руху тіла не залежить від вибору напрямку осі OX , а залежить від напрямку дії сили

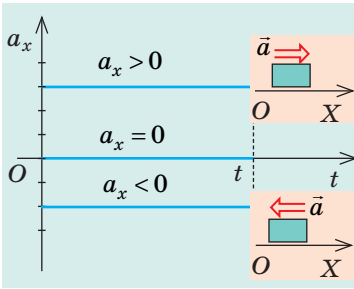


Рис. 6.2. Графік залежності $a_x(t)$ для рівноприскореного прямолінійного руху

• Якщо прискорення дорівнює нулю, швидкість руху тіла не змінюється ані за значенням, ані за напрямком: $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0$, тобто тіло рухається рівномірно прямолінійно. Таким чином, рівномірний прямолінійний рух — це окремий випадок рівноприскореного прямолінійного руху.

• У разі рівноприскореного руху прискорення залишається незмінним, тому графік проекції прискорення (графік залежності $a_x(t)$) — відрізок прямої, паралельної осі часу (рис. 6.2).

2 Швидкість рівноприскореного прямолінійного руху

Для рівноприскореного прямолінійного руху рівняння проекції швидкості має вигляд:

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

Якщо задано рівняння проекції швидкості руху тіла, то задано й початкову швидкість (\vec{v}_0), й прискорення (\vec{a}) руху цього тіла.

Наприклад, рівняння проекції швидкості руху має вигляд: $v_x = -5 + 3t$. Це означає: $v_{0x} = -5$ м/с (початкова швидкість руху дорівнює 5 м/с, а її напрямок протилежний напрямку осі OX); $a_x = 3$ м/с² (прискорення руху дорівнює 3 м/с², а його напрямок збігається з напрямком осі OX).

Залежність $v_x = v_{0x} + a_x t$ є лінійною, тому графік проекції швидкості — графік залежності $v_x(t)$ — це відрізок прямої, нахиленої під певним кутом до осі часу (рис. 6.3, 6.4).

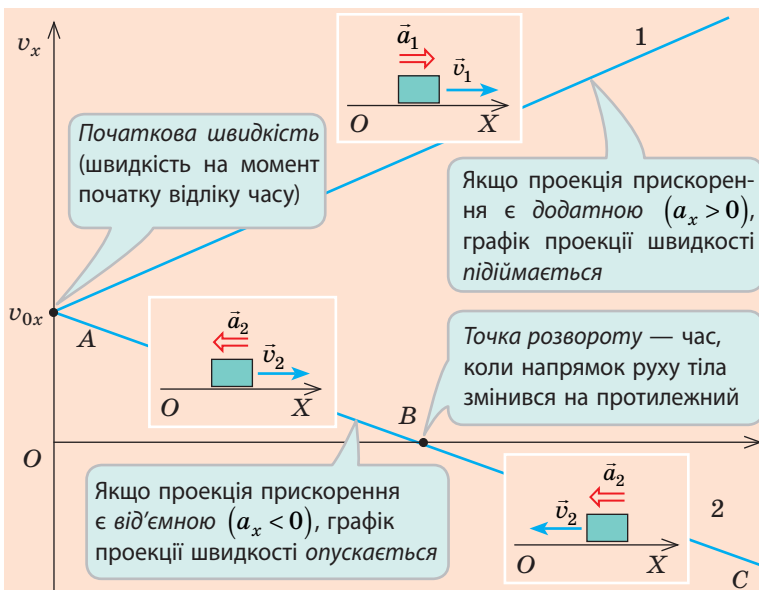


Рис. 6.3. Графіки залежності $v_x(t)$ для рівноприскореного прямолінійного руху. Тіло 1 весь час набирає швидкості, оскільки $\vec{a}_1 \uparrow \vec{v}_1$. Тіло 2 спочатку сповільнює свій рух: $\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$ (ділянка AB), потім зупиняється (точка B), після чого набирає швидкості ($\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$), рухаючись у протилежному напрямку (ділянка BC)

Чим більшим є прискорення руху тіла, тим більше кут α нахилу графіка проекції швидкості до осі часу (див. рис. 6.4).

3 Переміщення під час рівноприскореного прямолінійного руху

Ви вже знаєте про геометричний зміст проекції переміщення: *переміщення тіла чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності проекції швидкості руху тіла від часу*. Ми доводили це твердження для рівномірного руху. Розглянемо приклад рівноприскореного руху:

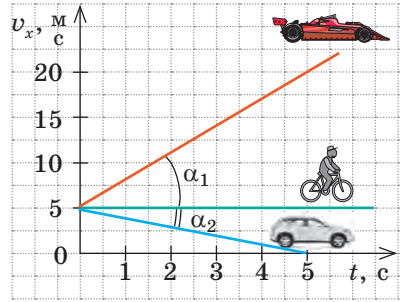
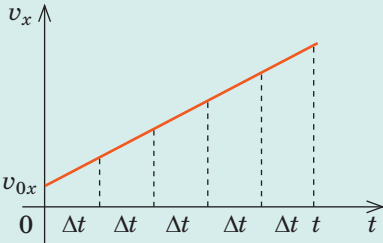
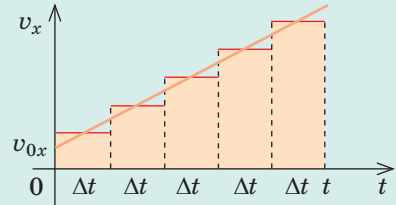


Рис. 6.4. Болід рухається з більшим прискоренням, ніж автомобіль, тому $\alpha_1 > \alpha_2$. Прискорення руху велосипедиста дорівнює нулю

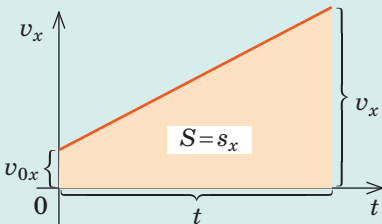
1 Розіб'ємо весь час руху тіла на невеликі інтервали часу Δt .



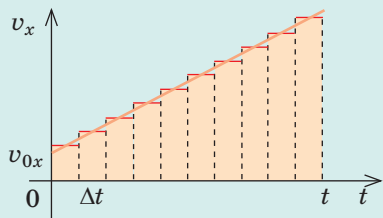
2 Припустимо, що протягом кожного інтервалу часу швидкість руху тіла залишалася незмінною. Загальне переміщення під час такого уявного руху дорівнює сумі площ смужок завширшки Δt , які разом утворюють сідчасту фігуру.



4 У результаті нескінченного зменшення інтервалів часу ($\Delta t \rightarrow 0$) сідчаста фігура «перетвориться» на трапецію, а переміщення чисельно дорівнюватиме площі цієї трапеції.



3 Якщо зменшити інтервали часу Δt , то переміщення, як і раніше, дорівнюватиме площі сідчастої фігури, яка поступово набуває вигляду трапеції.



Бачимо, що в разі рівноприскореного руху проекція переміщення чисельно дорівнює площі трапеції (формулу для визначення площі трапеції ви знаєте з курсу геометрії):

$$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$$

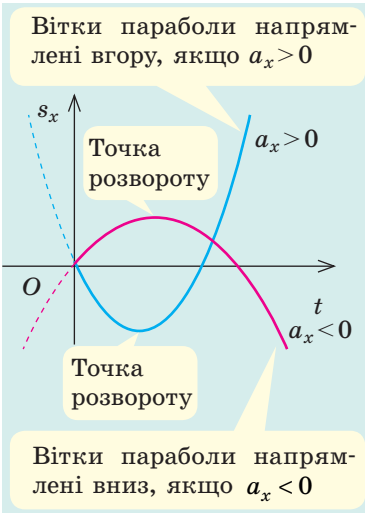


Рис. 6.5. У разі рівноприскореного прямолінійного руху графік залежності $s_x(t)$ — парабола, яка проходить через початок координат



Рис. 6.6. У разі рівноприскореного прямолінійного руху графік залежності $x(t)$ — парабола

Взявши до уваги, що $v_x = v_{0x} + a_x t$, отримаємо **рівняння залежності проекції переміщення від часу для рівноприскореного прямолінійного руху:**

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

Під час рівноприскореного прямолінійного руху початкова швидкість (\vec{v}_0) і прискорення (\vec{a}) руху тіла не змінюються, тому залежність проекції переміщення s_x від часу t є **квадратичною**, а графік цієї залежності — **парабола** (рис. 6.5), вершина якої відповідає точці розвороту (див. ще розв'язання задачі 2 у п. 4).

У багатьох задачах не йдеться про час руху тіла й не потрібно його визначати. У таких випадках для розрахунку невідомих величин використовують формулу:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$$

? Отримайте останню формулу самостійно, скориставшись формулою $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2}t$ й означенням прискорення.

Координату тіла в будь-який момент часу можна визначити за формулою $x = x_0 + s_x$, тому **для рівноприскореного прямолінійного руху рівняння координати** має вигляд:

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

Тобто залежність $x(t)$, як і залежність $s_x(t)$, є **квадратичною**, а графік цієї залежності — **парабола** (рис. 6.6).

ПРОФЕСІЯ МАЙБУТНЬОГО



Диспетчер автономного транспорту

конструює, планує і координує рух автономних транспортних засобів, здійснює моніторинг їх руху

Зараз більшість ДТП відбуваються через людські похибки. Застосування автономного транспорту (керування яким автоматизовано та здійснюється без водія) може знизити кількість аварій, зменшити затори, зекономити паливе.

Знання фізики допоможе диспетчерові спланувати рух автотранспорту з автопілотами, обрати найкращий комп'ютерний алгоритм, забезпечити безпечність руху тощо.

Алгоритм розв'язування задач із кінематики

1. Уважно прочитайте умову задачі. З'ясуйте, які тіла беруть участь у русі, яким є характер руху тіл, які параметри руху відомі.

2. Запишіть коротку умову задачі. У разі необхідності переведіть значення фізичних величин в одиниці СІ.

3. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому позначте вісь координат, напрямки швидкості руху, переміщення, початкової швидкості та прискорення руху тіла.

4. Із формул, що описують прямолінійний рівноприскорений рух, виберіть ті, які найбільше відповідають умові задачі.

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}; v_x = v_{0x} + a_x t;$$

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

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x};$$

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

Обрані формули конкретизуйте для задачі.

5. Розв'яжіть задачу в загальному вигляді.

6. Перевірте одиницю, знайдіть значення шуканої величини.

7. Проаналізуйте результат.

8. Запишіть відповідь.

4 Учимся розв'язувати задачі

Задача 1. Гальмо легкового автомобіля є справним, якщо на сухому асфальті за швидкості 28 м/с гальмівний шлях автомобіля становить 49 м. Визначте час гальмування та прискорення руху автомобіля.

$$v_0 = 28 \text{ м/с}$$

$$s = 49 \text{ м}$$

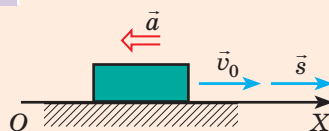
$$v = 0$$

$$t = ?$$

$$a = ?$$

Розв'язання

На пояснювальному рисунку спрямуємо вісь OX у напрямку руху автомобіля. Автомобіль гальмує, тому $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$.



Оскільки в задачі подано v_0 , v і s , для визначення часу гальмування найзручнішою є формула

$$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t \quad (1),$$

$$\text{а для визначення прискорення — формула } s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x} \quad (2).$$

Конкретизуємо ці формули (перейдемо від проєкцій до модулів):

- напрямок переміщення та напрямок початкової швидкості збігаються з напрямком осі OX , тому $v_{0x} = v_0$, $s_x = s$;
- кінцева швидкість дорівнює нулю: $v_x = 0$;
- напрямок прискорення протилежний напрямку осі OX , тому $a_x = -a$.

$$\text{Отже, із формули (1): } s = \frac{0 + v_0}{2} t = \frac{v_0}{2} t \Rightarrow t = \frac{2s}{v_0};$$

$$\text{із формули (2): } s = \frac{-v_0^2}{-2a} \Rightarrow a = \frac{v_0^2}{2s}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[t] = \frac{\text{м}}{\text{м/с}} = \text{с}, \quad t = \frac{2 \cdot 49}{28} = 3,5 \text{ (с)};$$

$$[a] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad a = \frac{28^2}{2 \cdot 49} = 8 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Відповідь: $t = 3,5 \text{ с}$; $a = 8 \text{ м/с}^2$.

Задача 2. На рис. 1 подано графік залежності $v_x(t)$ для руху тіла вздовж осі OX . 1) Опишіть характер руху тіла. 2) Запишіть рівняння залежності $s_x(t)$. 3) Побудуйте графік залежності $s_x(t)$.

Розв'язання

1) Графік залежності $v_x(t)$ — відрізок прямої, а тіло весь час рухалося вздовж осі Ox , тому рух тіла є рівноприскореним прямолінійним. Перші 2 с швидкість руху тіла зменшувалася від 20 м/с до 0, потім тіло розвернулося і ще 4 с прискорювало свій рух, рухаючись у протилежному напрямку.

2) Для рівноприскореного прямолінійного руху:

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

Початкова швидкість руху тіла: $v_{0x} = 20$ м/с.

Проекція прискорення: $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{0 - 20 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = -10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Отже, $s_x = 20t - 5t^2$.

3) Графік залежності $s_x(t)$ — парабола, вершина якої відповідає точці розвороту. Таким чином, точка A з координатами $t = 2$ с, $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 2 - 5 \cdot 2^2 = 20$ м є вершиною параболи. Ця парабола проходить через точку O з координатами $(t = 0, s_x = 0)$ і симетричну їй відносно прямої $t = 2$ точку B з координатами $(t = 4 \text{ с}, s_x = 0)$. Наприкінці спостереження: $t = 6$ с, $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 6 - 5 \cdot 6^2 = -60$ м (точка C).

За чотирма точками (O, A, B, C) можемо побудувати параболу (рис. 2).

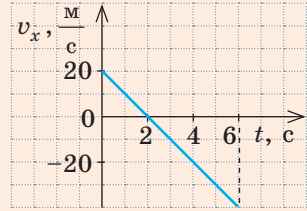


Рис. 1

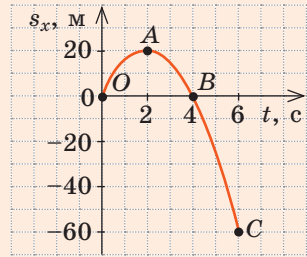


Рис. 2

**Підбиваємо підсумки**

- Рівноприскорений прямолінійний рух — це рух, під час якого тіло рухається прямолінійною траєкторією з незмінним прискоренням.
- Прискорення \vec{a} — векторна фізична величина, яка характеризує швидкість зміни швидкості руху тіла й дорівнює відношенню зміни швидкості до інтервалу часу, за який ця зміна відбулася: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.
- Для рівноприскореного прямолінійного руху тіла:
 - прискорення тіла не змінюється з часом, графік проекції прискорення (графік залежності $a_x(t)$) — пряма, паралельна осі часу;
 - швидкість руху змінюється лінійно: $v_x = v_{0x} + a_x t$, графік залежності $v_x(t)$ — відрізок прямої, нахиленої під певним кутом до осі часу;
 - проекція переміщення чисельно дорівнює площі фігури під графіком проекції швидкості руху: $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$ — у цьому полягає геометричний зміст переміщення;
 - рівняння проекції переміщення має вигляд: $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$ — це квадратична функція, тому графік залежності $s_x(t)$ — парабола, вершина якої відповідає точці розвороту;
 - координату тіла визначають із рівняння $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$; графік координати — парабола.



Контрольні запитання

1. Який рух називають рівноприскореним прямолінійним? **2.** Охарактеризуйте прискорення як фізичну величину. **3.** Як рухається тіло, якщо напрямок його прискорення: а) збігається з напрямком руху? б) протилежний напрямку руху? в) якщо прискорення тіла дорівнює нулю? **4.** Запишіть рівняння залежності $v_x(t)$ для рівноприскореного прямолінійного руху. Який вигляд має графік цієї залежності? **5.** За допомогою яких формул можна обчислити проекцію переміщення? Виведіть ці формули. **6.** Доведіть, що графіком залежності $s_x(t)$ є парабола. Як напрямлені її вітки? Якому моменту руху відповідає вершина? **7.** Запишіть рівняння координати для рівноприскореного прямолінійного руху. Назвіть фізичні величини, які пов'язує це рівняння.



Вправа № 6

Рух тіл вважайте рівноприскореним прямолінійним.

- Рівняння проекції швидкості руху мотоцикла $v_x = 20 - 4t$ (усі величини задано в одиницях СІ). Визначте:
 - прискорення та початкову швидкість руху мотоцикла;
 - час, через який мотоцикл зупиниться.
- Велосипедистка, що рухалася зі швидкістю 2,5 м/с, починає розганятися і, рухаючись із прискоренням 0,5 м/с², сягає швидкості 5 м/с.
 - Яким є переміщення велосипедистки за час розгону?
 - Скільки часу розганялася велосипедистка?
 - Запишіть рівняння проекції швидкості руху та проекції переміщення.
 - Якою була швидкість руху велосипедистки через 2 с після початку розгону? Через який інтервал часу швидкість її руху становила 4 м/с?
 - Побудуйте графіки залежності від часу проекції швидкості та проекції переміщення велосипедистки. Покажіть на графіку $v_x(t)$ переміщення велосипедистки за 3 с розгону.
 - Через який час після початку розгону велосипедистка подолає відстань 14 м, якщо рухатиметься з незмінним прискоренням?
- На рис. 1 подано графік залежності $v_x(t)$ для руху тіла вздовж осі ОХ.

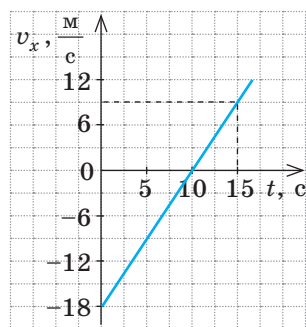


Рис. 1

- Опишіть характер руху тіла.
 - Запишіть рівняння залежності $s_x(t)$.
 - Побудуйте графік залежності $s_x(t)$.
- Потяг, що рухається зі швидкістю 25 м/с, починає гальмувати й зупиняється через 2 км.
 - Скільки часу тривало гальмування?
 - Яким було прискорення руху потяга?
 - Якою була середня швидкість руху потяга під час гальмування?
 - Яким було переміщення потяга за перші 4 с гальмування? за останні 10 с гальмування?
- Визначте час і координату зустрічі мотоцикліста і пішохода (рис. 2).
- Складіть задачу за даними, поданими на початку § 6, і розв'яжіть її.

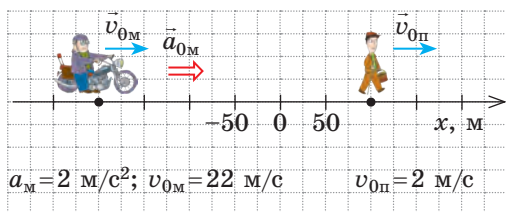


Рис. 2

§ 7. ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ ТА КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ ПІД ДІЄЮ НЕЗМІННОЇ СИЛИ ТЯЖІННЯ



«Людина — гарматне ядро» — цирковий номер із такою назвою вперше був показаний 1877 р. у Лондоні. 16-річну повітряну гімнастку помістили в дуло «гармати», здійснили постріл, і дівчина, пролетівши над головами захоплених глядачів, опустилася на страховальну сітку. Сучасні аналогічні «гармати» — це величезні пневматичні пістолети. Як вони працюють, пропонуємо вам дізнатися самостійно, а зараз розглянемо, на які закони спираються творці подібних атракціонів.

1 Згадуємо вільне падіння

Аристотель стверджував: чим тіло важче, тим швидше воно падає на Землю. Проте вам відомо, що так буде, якщо рух відбуватиметься в повітрі, а от в разі відсутності повітря всі тіла — незалежно від їхньої маси, об'єму, форми — падають на Землю однаково (рис. 7.1).

Падіння тіл у безповітряному просторі, тобто падіння лише під дією сили тяжіння, називають **вільним падінням**.

У разі вільного падіння всі тіла падають на Землю з однаковим прискоренням — *прискоренням вільного падіння* (\vec{g}).

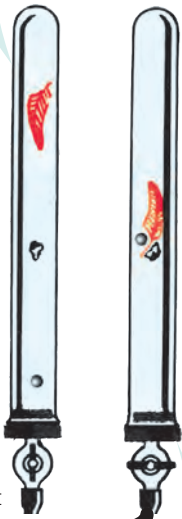
- Вектор прискорення вільного падіння завжди напрямлений вертикально вниз.
- Прискорення вільного падіння вперше виміряв нідерландський математик, астроном і фізик *Крістіан Гюйгенс* (1629–1695) у 1656 р. *Поблизу поверхні Землі*, тобто на невеликій (порівняно з радіусом Землі) відстані, воно є практично незмінним і приблизно дорівнює $9,8 \text{ м/с}^2$.

2 Вільне падіння яких тіл розглядатимемо

Характер реального руху тіла в полі тяжіння Землі є досить складним (рис. 7.2), і його описування виходить за межі шкільної програми. Тому приймемо низку *спрощень*.

- Систему відліку, пов'язану з точкою на поверхні Землі, вважатимемо *інерціальною* (про інерціальні системи ви згадаєте в § 9).

Якщо трубку швидко перевернути, то першою впаде на дно сталевий кулька, потім — корок, а останнім — пташине перо



До помпи

Якщо з трубки відкачати повітря, усі три тіла впадуть на дно трубки одночасно

Рис. 7.1. Демонстрація вільного падіння тіл в трубі Ньютона

• Розглядатимемо рух тіл, розташованих поблизу поверхні Землі. Тоді кривизною поверхні Землі та зміною прискорення вільного падіння можна знехтувати, а *прискорення вільного падіння вважати незмінним*: $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$.

Розв'язуючи задачі, вважатимемо, що $g = 10 \text{ м/с}^2$, якщо не зазначено інше.

• *Опором повітря будемо нехтувати.* Це спрощення не спричинить серйозного викривлення результатів тільки тоді, коли *тіла досить важкі, невеликі за розмірами, а швидкість їхнього руху досить мала*. Саме такі тіла розглядатимемо далі.

? Візьміть книгу, аркуш паперу, гумку, олівець і зясуйте, як рух повітря впливає на падіння цих тіл.

1. Зі збільшенням висоти \vec{g} зменшується



3. Рухові тіл заважає опір повітря

Рис. 7.2. Фактори, які ускладнюють описання падіння тіл

3 Як рухається тіло, кинуте вертикально

Спостерігаючи за рухом невеликих важких тіл, які кинуті вертикально вниз або вертикально вгору або які падають без початкової швидкості, бачимо, що траєкторія їхнього руху — відрізок прямої. До того ж ці тіла рухаються з незмінним прискоренням.

Рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз, — це рівноприскорений прямолінійний рух із прискоренням, що дорівнює прискоренню вільного падіння:

$$\vec{a} = \vec{g}.$$

Згадаємо формули, які описують рівноприскорений прямолінійний рух, врахуємо, що, описуючи рух тіла по вертикалі, вектори швидкості, прискорення та переміщення традиційно проєктують на вісь OY , й отримаємо низку формул, якими описують вільне падіння тіл (див. [таблицю](#)).

Задача 1. Із гелікоптера, який висить над озером на висоті 45 м, скинули невеликий важкий предмет. 1) Через який інтервал часу предмет упаде в озеро? 2) Якою буде швидкість руху предмета в момент торкання води? 3) Визначте співвідношення переміщень предмета за будь-які рівні інтервали часу Δt .

Формули для розрахунку кінематичних характеристик вільного падіння	
Рівноприскорений рух уздовж осі OX	Вільне падіння уздовж осі OY
Проекція швидкості руху	
$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Проекція переміщення	
$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$s_y = h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$	$s_y = h_y = \frac{v_y + v_{0y}}{2} t$
$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	$s_y = h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$
Рівняння координати	
$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$	$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y}{2} t^2$

Аналіз фізичної проблеми. Виконаємо пояснювальний рисунок (рис. 1). Спрямуємо вісь OY вертикально вниз. Початок координат нехай збігається з положенням тіла в момент початку падіння. Швидкість руху тіла в цей момент дорівнює нулю.

Дано:

$$v_0 = 0 \\ s = h = 45 \text{ м} \\ g = 10 \text{ м/с}^2$$

t — ?

v — ?

$s_1 : s_2 : s_3 \dots$ — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Запишемо рівняння: проекції переміщення; проекції швидкості руху тіла:

$$s_y = h_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}; \quad v_y = v_{0y} + g_y t.$$

Конкретизуємо ці рівняння (перейдемо від проекцій до модулів). Із рис. 1 бачимо:

$$s_y = s = h; \quad g_y = g; \quad v_{0y} = 0.$$

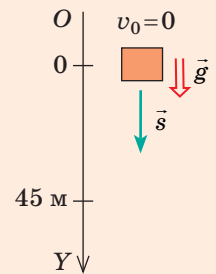


Рис. 1

Отже, маємо: $h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad v_y = gt.$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[t] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{м/с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 45}{10}} = 3 \text{ (с)}; \quad v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 3 \text{ с} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Для відповіді на запитання 3 скористаємося геометричним змістом переміщення (рис. 2). Вільне падіння тіл є рівноприскореним прямолінійним рухом, тому графік залежності $v_y(t)$ — це відрізок прямої, який починається в точці $(t = 0, v_y = 0)$.

Бачимо, що за перший інтервал часу Δt переміщення тіла чисельно дорівнює площі S_0 одного трикутника (площа фігури під графіком): $s_1 = 1S_0$; за другий інтервал часу Δt — площі трьох трикутників: $s_2 = 3S_0$; за третій інтервал часу Δt — площі п'яти трикутників: $s_3 = 5S_0$ і т. д.

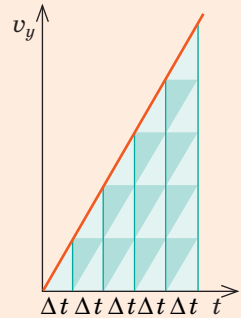


Рис. 2

Відповідь: $t = 3 \text{ с}; \quad v = 30 \text{ м/с}; \quad s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$

Під час вільного падіння без початкової швидкості переміщення тіла за рівні послідовні інтервали часу відносяться як непарні числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$$

Ця властивість стосується будь-якого рівноприскореного прямолінійного руху тіла. Наприклад, якщо за першу секунду тіло пододало 5 м, за другу воно подолає $3 \cdot 5 = 15$ м, за третю — $5 \cdot 5 = 25$ м, за четверту — $7 \cdot 5 = 35$ м і т. д.

4 Що падає швидше

Уявімо, що з моста в горизонтальному напрямку кинули камінець і в ту саму мить випустили з руки другий камінець. Який камінець упаде у воду швидше? Ніякий! Обидва камінця, якщо їм нічого не завадить, упадуть у воду одночасно.

Скориставшись спеціальним пристроєм і відеокамерою мобільного телефону, можемо легко підтвердити це твердження (рис. 7.3).

Отже, рухові тіла у вертикальному напрямку не «заважає» його рух у горизонтальному напрямку та навпаки. Тут ми зустрілися з проявом принципу незалежності руху, відповідно до якого будь-який складний рух можна розглядати як «суму» двох (або більше) простих рухів.

Штовхач надає кульці 2 горизонтальній швидкості. У той самий час кулька 1 звільняється і починає падати вертикально

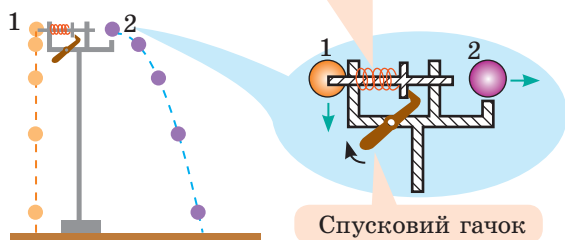


Рис. 7.3. Кулька 1, яка вільно падає без початкової швидкості, і кулька 2, кинута горизонтально, весь час перебувають на однаковій висоті й на Землю падають одночасно

5 Рух тіл, кинутих горизонтально або під кутом до горизонту

Скориставшись принципом незалежності руху, розглянемо рух тіла, якому поблизу поверхні землі надано певної початкової швидкості. Вважатимемо, що опір повітря нехтовно малий, тобто рух відбувається лише під дією сили тяжіння з прискоренням \vec{g} . Такий рух зручно розглядати як результат «додавання» двох незалежних рухів (рис. 7.4):

1) *горизонтального* — рівномірного уздовж осі OX (оскільки $g_x = 0$), який описується рівняннями:

$$v_x = v_{0x}; \quad x = x_0 + v_{0x}t;$$

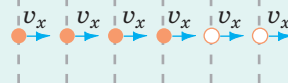
2) *вертикального* — рівноприскореного (з прискоренням \vec{g}) уздовж осі OY , який описується рівняннями:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2} t^2.$$

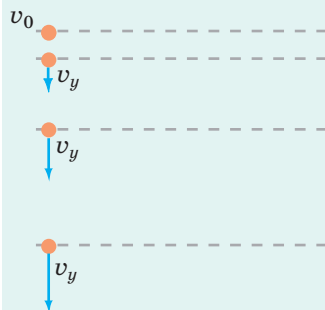
• Модуль і напрямок швидкості руху тіла в довільній точці траєкторії визначаємо, скориставшись теоремою Піфагора та означенням тангенса (рис. 7.5): $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$; $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}$.

• Якщо з рівняння $x = x_0 + v_{0x}t$ знайти t і підставити одержаний вираз у рівняння $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2} t^2$, отримаємо рівняння траєкторії руху тіла, яке має вигляд квадратичної функції: $y(x) = Ax^2 + Bx + C$.

Горизонтальний рух — швидкість руху не змінюється



Вертикальний рух — рівноприскорений рух з прискоренням \vec{g}



Складний рух

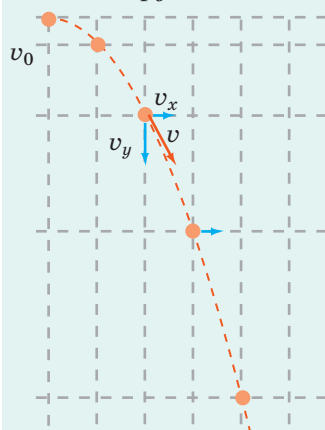


Рис. 7.4. Складення вертикального і горизонтального рухів тіла. Положення тіла подано через рівні інтервали часу

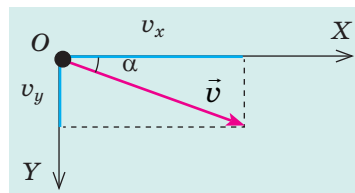


Рис. 7.5. До визначення швидкості руху тіла

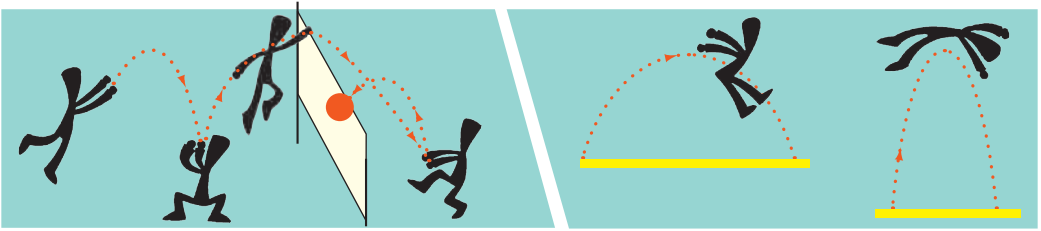


Рис. 7.6. Траєкторії руху тіл, кинутих горизонтально або під кутом до горизонту, є параболічними, і їх кривизна залежить від початкової швидкості руху тіл

Таким чином, траєкторія руху тіла, якому поблизу поверхні землі надано певної початкової швидкості, є параболічною (рис. 7.6).

6 Рух тіла, кинутого горизонтально

Задача 2. Мотоцикліст, що рухався гірською дорогою зі швидкістю 15 м/с, не загальмував перед поворотом, і його мотоцикл упав з висоти 20 м у сніговий намет. 1) Скільки часу падав мотоцикл? 2) Якою є горизонтальна дальність польоту мотоцикла? Як, на вашу думку, зміниться ця дальність у реальній ситуації? Опором повітря знехтувати.

Дано:

$$v_0 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 20 \text{ м}$$

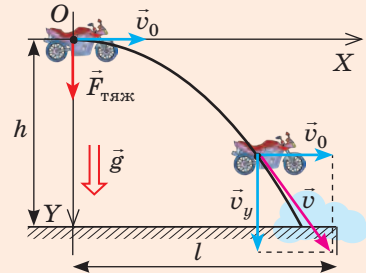
$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

t — ?

l — ?

Розв'язання

Оберемо систему відліку: пов'яжемо початок координат з місцем, де мотоцикл з'їхав з дороги, вісь OY спрямуємо вертикально вниз, вісь OX — у напрямку початкової швидкості руху мотоцикла (див. рисунок).



В обраній системі відліку:

рух уздовж осі OX — рівномірний:

$$v_x = v_{0x}; \quad x = x_0 + v_{0x}t \quad (1)$$

рух уздовж осі OY — рівноприскорений:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2} \quad (2)$$

Із рисунка бачимо:

$$v_{0x} = v_0; \quad x_0 = 0; \quad x = l$$

$$v_{0y} = 0; \quad y_0 = 0; \quad y = h,$$

тому рівняння 1 і 2 набувають вигляду:

$$v_x = v_0; \quad l = v_0 t$$

$$v_y = gt; \quad h = \frac{gt^2}{2}$$

Зверніть увагу! Виділені формули справедливі для описання руху будь-якого горизонтально кинутого тіла.

1) Визначимо час падіння мотоцикла: $h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{10}} = 2 \text{ (с)}$.

2) Обчислимо дальність польоту: $l = v_0 t; \quad l = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2 \text{ с} = 30 \text{ м}$.

Проаналізуємо результат. Очевидно, що в реальній ситуації дальність польоту буде меншою, адже рухові заважає опір повітря. Проте зрозуміло, це не означає, що падіння буде безпечнішим. *Будьте обережними і пильними на дорогах!*

Відповідь: $t = 2 \text{ с}; \quad l = 30 \text{ м}$.

7 Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

Прочитавши про рекорди швидкості польоту спортивних снарядів, учениця вирішила з'ясувати, якої швидкості вона надає футбольному м'ячу. Для цього дівчинка вдарила по м'ячу, спрямувавши його під кутом 45° до горизонту (див. рис. 7.8). М'яч упав на землю на відстані 50 м від учениці. Виконавши розрахунки, дівчинка вирішила, що вона надала м'ячу швидкості 25 м/с, а м'яч піднявся на висоту другого поверху школи. Чи не помилилася учениця?



Рис. 7.8. За напрямком і дальністю польоту м'яча ви можете визначити, якої швидкості ви надали м'ячу під час удару або кидка

Ознайомтеся з розв'язком цієї задачі в загальному вигляді (див. нижче). Скориставшись отриманими формулами, оцініть розрахунки дівчинки, а після уроків виконайте експериментальне завдання наприкінці § 7.

Задача 3. Футболістка ударив по м'ячу надавши йому швидкості v_0 , напрямленої під кутом α до горизонту. Визначте дальність польоту та найбільшу висоту підйому м'яча.

Дано:

v_0

α

g

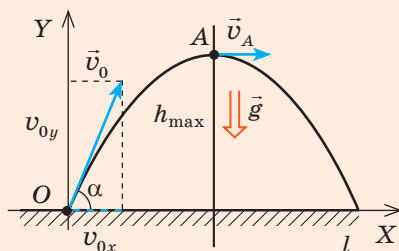
L — ?

h_{\max} — ?

Розв'язання

1) Виконаємо пояснювальний рисунок (рис. 1):

початок координат пов'яжемо з точкою на поверхні Землі, де м'яч відірвався від бутси футболістки; вісь OY спрямуємо вертикально вгору; вісь OX — горизонтально.



В обраній системі відліку:

Рис. 1

рух уздовж осі OX — рівномірний:

$$v_x = v_{0x}, \quad x = x_0 + v_{0x}t, \quad (1)$$

де $x_0 = 0$, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$

рух уздовж осі OY — рівноприскорений:

$$v_y = v_{0y} + g_y t, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad (2)$$

де $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, $g_y = -g$,

тому рівняння (1) і (2) набувають вигляду:

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad x = v_0 \cos \alpha \cdot t$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$$

Час t_1 руху м'яча до верхньої точки траєкторії (точки A) знайдемо з умови $v_y(t_1) = 0$:

$$v_0 \sin \alpha - gt_1 = 0 \Rightarrow t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Координата y м'яча в точці A — це максимальна висота підйому м'яча:

$$h_{\max} = y_A = v_0 \sin \alpha \cdot t_1 - \frac{gt_1^2}{2}.$$

Після підстановки t_1 отримуємо формули для визначення максимальної висоти

підйому та загального час руху м'яча: $h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$; $t = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

Дальність L польоту дорівнює координаті x тіла наприкінці руху ($x=L$):

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t = v_0 \cos \alpha \cdot \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \text{ Оскільки } 2\cos \alpha \cdot \sin \alpha = \sin 2\alpha, \text{ то } L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Зверніть увагу! З останньої формули випливає:

- якщо кинути тіло під кутом α , а потім під кутом $90^\circ - \alpha$, то дальність польоту не зміниться, тобто тіло попаде в ту саму точку, рухаючись різними траєкторіями (рис. 2);
- максимальна дальність польоту тіла досягається, якщо $\alpha = 45^\circ$ ($\sin 2\alpha = 1$).

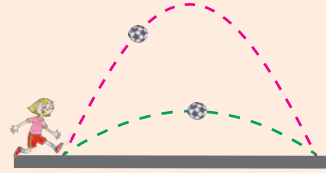


Рис. 2



Підбиваємо підсумки

• Падіння тіл у безповітряному просторі, тобто падіння лише під дією сили тяжіння, називають вільним падінням.

• У разі вільного падіння всі тіла падають на Землю з однаковим прискоренням — прискоренням вільного падіння (\vec{g}). Вектор прискорення вільного падіння завжди напрямлений вертикально вниз; за модулем $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

• Рух тіла, кинутого вертикально вгору або вниз, — це рівноприскорений прямолінійний рух із прискоренням, що дорівнює прискоренню вільного падіння: $\vec{a} = \vec{g}$.

• Траєкторія руху тіла, кинутого горизонтально або під кутом до горизонту, — параболічна. Такі рухи розглядають як результат складання двох простих рухів: горизонтального — рівномірного уздовж осі OX і вертикального — рівноприскореного (з прискоренням \vec{g}) уздовж осі OY . При цьому рівняння залежностей швидкості та координати від часу мають вигляд:

$$v_x = v_{0x}, \quad x = x_0 + v_{0x}t; \quad v_y = v_{0y} + g_y t, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$



Контрольні запитання

1. Який рух називають вільним падінням тіл? Яким є характер цього руху?
2. Як напрямлено прискорення вільного падіння та чому воно дорівнює?
3. Запишіть у загальному вигляді рівняння руху тіла під дією сили тяжіння.
4. Який вигляд матимуть рівняння руху, якщо тіло кинуте вертикально? горизонтально? під кутом до горизонту?
5. Якою є траєкторія руху тіла, кинутого вертикально? горизонтально? під кутом до горизонту? Наведіть приклади.
6. Як визначити модуль і напрямок швидкості руху тіла в будь-якій точці траєкторії?



Вправа № 7

Опором повітря нехтувати.

1. Металеву кульку підняли на висоту 1,8 м над підлогою і відпустили. На якій висоті прискорення вільного падіння кульки буде найбільшим: а) на висоті 1,8 м; б) на висоті 1 м; в) у момент удару об підлогу? На якій висоті із зазначених буде найбільшою швидкість руху кульки? Визначте цю швидкість.

2. Стрілу випустили з лука вертикально вгору зі швидкістю 10 м/с. Відомо, що через 2 с вона вже падала вниз із тією самою швидкістю. Визначте максимальну висоту польоту, шлях і переміщення стріли протягом цих 2 с.
3. Струмінь води з брандспойта, спрямований під кутом 60° до горизонту, сягнув висоти 15 м (рис. 1).
 - 1) Знайдіть: а) швидкість витікання води; б) час польоту частинок струменя, в) дальність польоту частинок струменя.
 - 2) Якою буде дальність струменя, якщо спрямувати його під кутом 30° до горизонту?
 - 3) Чому струмінь води розширюється?
4. З гелікоптера, який перебував на висоті 45 м і рухався зі швидкістю 10 м/с, упав невеликий важкий предмет. Через який інтервал часу предмет упаде на землю? Якою буде швидкість руху предмета у цей момент? Розв'яжіть задачу для випадків, коли гелікоптер: 1) піднімається вгору; 2) опускається вниз; 3) рухається горизонтально.
5. Кабінка оглядового колеса в Харкові (рис. 2) піднімається на висоту 55 м, час одного оберту становить 15 хв. Визначте швидкість руху відвідувача цього атракціону.



Рис. 1



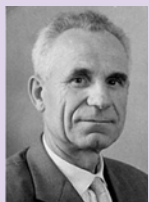
Рис. 2



Експериментальне завдання

Оцініть швидкість руху, якої ви надаєте м'ячу під час удару ногою; під час горизонтального кидка; під час вертикального кидка. Які вимірювання вам необхідно для цього виконати? У разі необхідності скористайтеся прикладами розв'язання задач у § 7.

Фізика і техніка в Україні



Архип Михайлович Люлька (1908–1984) — видатний український радянський конструктор авіаційних двигунів. Народився в с. Саварка Київської губернії, навчався в Київському політехнічному інституті.

Працюючи в Харківському авіаційному інституті, А. М. Люлька створив конструкцію першого в СРСР двоконтурного турбореактивного двигуна. Першим розробив турбореактивні двигуни для надзвукової авіації. Згодом на літаках із двигунами конструкції А. М. Люльки було встановлено десятки світових рекордів. Під його керівництвом створено дослідно-конструкторське бюро, яке зараз носить його ім'я. З 1968 р. — академік АН СРСР. На алеї видатних учених у Київській політехніці встановлено пам'ятник А. Люльці.

§ 8. РІВНОМІРНИЙ РУХ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПО КОЛУ



У давнину воїни користувалися пращею — простою, але дуже цікавою за принципом дії зброєю для метання каменів, кульок тощо: у мотузку (або смужку шкіри) вкладали «снаряд», розкручували мотузку по коловій траєкторії і в певний момент часу відпускали один кінець — «снаряд» прямував до цілі. А чому випущений із праці камінь не продовжує рухатися по колу, а поводиться так, ніби його кинули в певному напрямку з дуже великою швидкістю? Про це та інші особливості руху по колу — у цьому параграфі.

1 Які особливості криволінійного руху

Рух по колу — це криволінійний рух, а будь-який криволінійний рух набагато складніший за прямолінійний.

- По-перше, у разі криволінійного руху змінюються щонайменше дві координати тіла.
- По-друге, безперервно змінюється напрямок вектора миттєвої швидкості: цей вектор завжди збігається з дотичною до траєкторії руху тіла в точці, що розглядається, й напрямлений у бік руху тіла (рис. 8.1, 8.2).
- По-третє, криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням: навіть якщо модуль швидкості залишається незмінним, напрямок швидкості безперервно змінюється.

? Чому камінь, який воїн випускає з праці, не продовжує рухатися по колу? Якою буде траєкторія руху каменя?

2 Що таке лінійна швидкість

Скалярну фізичну величину, яка характеризує криволінійний рух і дорівнює середній шляховій швидкості, виміряній за нескінченно малий інтервал часу, називають **лінійною швидкістю руху тіла**:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \text{ якщо } \Delta t \rightarrow 0$$

Оскільки для дуже малих інтервалів часу модуль переміщення (Δs) наближається до довжини ділянки траєкторії (Δl) (див. рис. 8.1), **лінійна швидкість у даній точці дорівнює модулю миттєвої швидкості**.

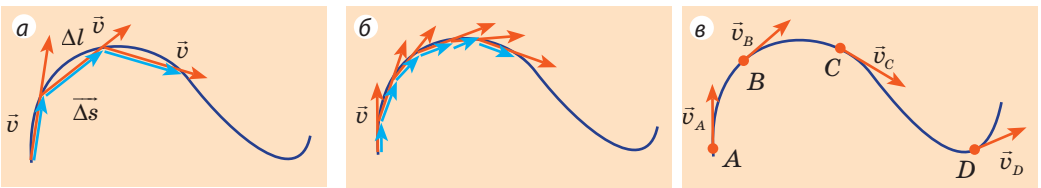


Рис. 8.1. Розбиваючи траєкторію руху тіла на дедалі менші ділянки Δl , бачимо, що вектор швидкості все більше наближається до дотичної (а, б). У даній точці миттєва швидкість напрямлена вздовж дотичної до траєкторії руху тіла (в)



Рис. 8.2. Швидкості руху іскор феєрверка, бризок з-під коліс автомобіля, металевих ошукорк напрямлені по дотичній до кола. Саме в цьому напрямку частинки продовжують свій рух після відриву

Саме лінійну швидкість мають на увазі, коли, наприклад, характеризують рух автомобіля на повороті, йдеться про швидкість польоту штучних супутників Землі, описують рух частинки в прискорювачі тощо.

Із часом лінійна швидкість може змінюватися, а може залишатися незмінною. Залежно від цього у фізиці розглядають *нерівномірний криволінійний рух* (рух зі змінною лінійною швидкістю) і *рівномірний криволінійний рух* (рух із незмінною лінійною швидкістю).

У разі *рівномірного криволінійного руху* за будь-які рівні інтервали часу тіло долає однаковий шлях, тому *лінійну швидкість руху тіла можна визначити за формулою:*

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

де l — шлях, пройдений тілом; t — час руху.

Описувати криволінійний рух досить складно, адже різних форм криволінійних траєкторій — безліч. Однак практично будь-яку складну криволінійну траєкторію можна подати як сукупність дуг різних радіусів, а криволінійний рух розглядати як рух по колу (рис. 8.3). Розглянемо найпростіший вид криволінійного руху — *рівномірний рух по колу*.

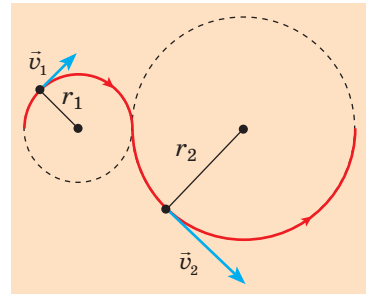


Рис. 8.3. У кожній точці колової траєкторії швидкість руху напрямлена уздовж дотичної до кола, тобто перпендикулярно до радіуса

3

Які фізичні величини характеризують рівномірний рух по колу

Рівномірний рух тіла по колу — це такий криволінійний рух, при якому траєкторією руху тіла є коло, а лінійна швидкість руху не змінюється з часом.

Із курсу фізики 8 класу ви знаєте, що рівномірний рух по колу — це періодичний рух, а отже, він характеризується такими фізичними величинами, як *період* і *частота*.

Період обертання T — фізична величина, яка дорівнює інтервалу часу, за який тіло здійснює один оберт: $T = \frac{t}{N}$ (N — кількість обертів, здійснених тілом за інтервал часу t). **Одиниця періоду обертання в СІ — секунда:** $[T] = \text{с}$.

Обертova частота n — фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості обертів за одиницю часу: $n = \frac{N}{t}$. *Одиниця обертovої частоти в СІ — оберт за секунду: $[n] = \text{об/с}$.*

Період і обертova частота є взаємно оберненими величинами: $T = \frac{1}{n}$

Знаючи період обертання та радіус кола, по якому рухається тіло, легко визначити **лінійну швидкість v** руху тіла. Дійсно, за час одного обертв ($t = T$) тіло долає відстань, яка дорівнює довжині кола: $l = 2\pi r$. Оскільки $v = l/t$, маємо:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (1)$$

Для характеристики руху тіла по колу окрім лінійної швидкості часто використовують **кутову швидкість**.

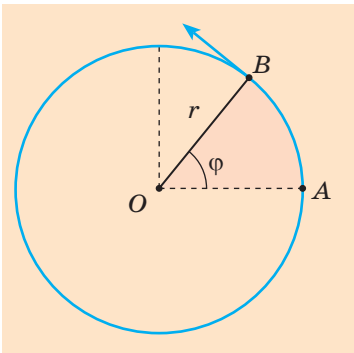


Рис. 8.4. Рівномірний рух тіла по колу: r — радіус кола; \vec{v} — вектор миттєвої швидкості в точці B ; φ — кут повороту радіуса

Кутova швидкість — це фізична величина, яка чисельно дорівнює куту повороту радіуса за одиницю часу:

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

де ω — кутova швидкість; φ — кут повороту радіуса за інтервал часу t (рис. 8.4).

Одиниця кутової швидкості в СІ — радіан за секунду: $[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}} (s^{-1})$.

За час, що дорівнює одному періоду ($t = T$), радіус виконує один оберт ($\varphi = 2\pi$), тому кутovu швидкість можна обчислити за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Із формул (1) і (2) випливає, що кутova та лінійна швидкості пов'язані співвідношенням:

$$v = \omega r$$

4 Чому в разі рівномірного руху тіла по колу прискорення називають доцентровим

Нагадаємо, що будь-який криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням, оскільки напрямок миттєвої швидкості безперервно змінюється.

Визначимо напрямок прискорення тіла під час його рівномірного руху по колу. За означенням $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, тому напрямки векторів прискорення та зміни швидкості збігаються ($\vec{a} \uparrow \uparrow \Delta \vec{v}$). Визначимо напрямок вектора зміни швидкості $\Delta \vec{v}$ (рис. 8.5, а). Бачимо, що вектор $\Delta \vec{v}$ напрямлений усередину кола. Так само напрямлений і вектор прискорення \vec{a} . Доведемо, що вектор \vec{a}

Перенесемо вектор \vec{v} паралельно самому собі так, щоб він виходив із точки A , і знайдемо різницю векторів $(\vec{v} - \vec{v}_0)$ — вектор зміни швидкості $(\Delta\vec{v})$

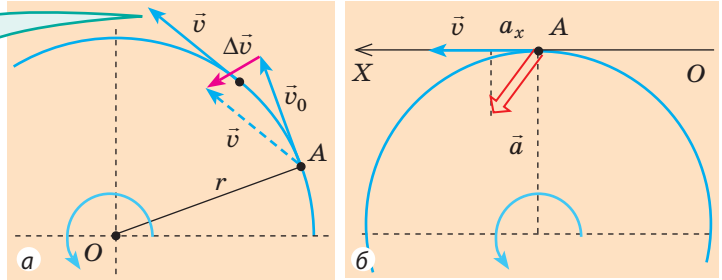


Рис. 8.5. Визначення напрямку прискорення рівномірного руху тіла по колу

напрявлений безпосередньо до центра кола, тобто вздовж радіуса. Оскільки миттєва швидкість \vec{v} руху тіла напрямлена по дотичній, а дотична перпендикулярна до радіуса r , потрібно довести, що $\vec{a} \perp \vec{v}$.

Доведення здійснимо методом від супротивного. Припустимо, що вектор прискорення \vec{a} не є перпендикулярним до вектора миттєвої швидкості \vec{v} (рис. 8.5, б). Однак у такому випадку швидкість руху тіла буде збільшуватися, якщо $a_x > 0$, і зменшуватися, якщо $a_x < 0$, — отже, йдеться про нерівномірний рух, тоді як ми розглядаємо рівномірний рух. Таким чином, наше припущення було хибним. Отже, $\vec{a} \perp \vec{v}$.

У разі рівномірного руху тіла по колу:

- вектор прискорення напрямлений до центра кола — саме тому прискорення тіла під час його руху по колу називають доцентровим прискоренням $\vec{a}_{\text{дц}}$ (рис. 8.6);
- модуль доцентрового прискорення обчислюють за формулами:

$$a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r} ; \quad a_{\text{дц}} = \omega^2 r$$

де v — лінійна швидкість; r — радіус кола; ω — кутова швидкість.

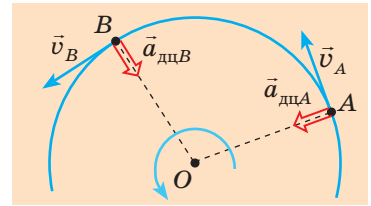


Рис. 8.6. У випадку рівномірного руху по колу прискорення руху тіла в даній точці завжди напрямлене до центра кола (є перпендикулярним до миттєвої швидкості)



Підбиваємо підсумки

- У разі криволінійного руху вектор миттєвої швидкості збігається з дотичною до траєкторії руху тіла, напрямком миттєвої швидкості безперервно змінюється, тому криволінійний рух — це завжди рух із прискоренням. Криволінійний рух, під час якого траєкторією руху тіла є коло, а лінійна швидкість не змінюється з часом, називають рівномірним рухом по колу.
- У разі рівномірного руху:
 - миттєва швидкість перпендикулярна до радіуса кола; за модулем дорівнює лінійній швидкості й обчислюється за формулами: $v = \frac{l}{t}$; $v = \frac{2\pi r}{T}$, де T — період обертання; r — радіус кола;

* Спробуйте довести цю формулу самостійно або скористатися додатковими джерелами інформації.

— кутова швидкість ω чисельно дорівнює куту φ повороту радіуса за одиницю часу t , обчислюється за формулами $\omega = \frac{\varphi}{t}$; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ і пов'язана з лінійною швидкістю v співвідношенням $v = \omega r$;

— прискорення є доцентровим ($\vec{a}_{\text{дц}}$), тобто напрямлене до центра кола; його модуль обчислюють за формулами: $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}$; $a_{\text{дц}} = \omega^2 r$.



Контрольні запитання

1. Чи може тіло рухатися криволінійною траєкторією без прискорення? Доведіть ваше твердження.
2. Як у разі криволінійного руху напрямлений вектор миттєвої швидкості?
3. Які фізичні величини характеризують рух тіла по колу? Дайте їхні характеристики.
4. Яким співвідношенням пов'язані кутова та лінійна швидкості руху? Виведіть це співвідношення.
5. Доведіть, що в разі рівномірного руху по колу прискорення напрямлене до центра цього кола.
6. За якими формулами визначають доцентрове прискорення?



Вправа № 8

1. Для чого поверх коліс велосипеда надівають щитки?
2. На рис. 1 показано траєкторію автомобіля, який рухається з незмінною швидкістю. У якій із зазначених точок траєкторії доцентрове прискорення автомобіля найбільше? найменше?

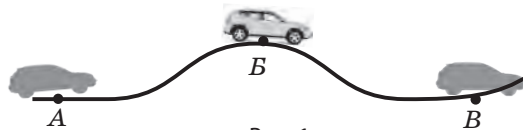


Рис. 1

3. Автомобіль рухається зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту з радіусом кривизни 30 м. Чому дорівнює і куди напрямлене прискорення руху автомобіля?
4. Хлопчик і дівчинка рівномірно рухаються по колах різного радіуса: $r_2 = 1,5r_1$ (рис. 2). У скільки разів швидкість руху хлопчика повинна бути більшою за швидкість руху дівчинки, щоб вони весь час перебували на одному радіусі? У якому співвідношенні будуть прискорення їх руху?
5. Точка на ободі колеса велосипеда рухається з прискоренням 100 м/с^2 , радіус колеса — 0,4 м. Яка швидкість велосипеда? Скільки обертів за хвилину здійснює колесо? Вважайте, що $\pi^2 = 10$.
6. Хвилинна стрілка годинника втричі довша за секундну. У скільки разів більше прискорення руху кінця секундної стрілки?
7. З якою швидкістю має летіти літак над екватором Землі, щоб для людей у літаку Сонце не змінювало свого положення на небосхилі?

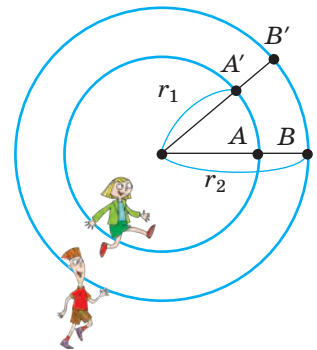


Рис. 2



Експериментальне завдання

Визначте доцентрове прискорення, лінійну та кутову швидкості руху точки на диску мікрохвильової печі (іграшкового автомобіля, міксеру тощо). Які вимірювання вам необхідно здійснити, щоб виконати це завдання?

Тема. Визначення прискорення тіла в ході рівноприскореного прямолінійного руху.

Мета: визначити прискорення руху кульки, яка скочується похилим жолобом.

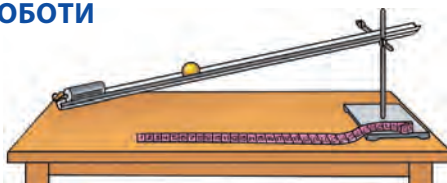
Обладнання: металевий або дерев'яний жолоб, кулька, штатив із муфтою та лапкою, секундомір, вимірювальна стрічка, металевий циліндр або інший предмет для припинення руху кульки по жолобу.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

II

Підготовка до експерименту

1. Закріпіть жолоб у лапці штатива. Опустіть лапку, розташувавши жолоб під невеликим кутом до горизонту (див. рисунок).
2. У нижній частині жолоба розташуйте металевий циліндр.
3. У верхній частині жолоба зробіть позначку.



▶

Експеримент

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

1. Виміряйте відстань s від позначки до циліндра (ця відстань дорівнює модулю переміщення кульки вздовж жолоба).
2. Розташуйте кульку навпроти позначки та виміряйте час t_1 , за який скочується кулька (до моменту її удару об металевий циліндр).
3. Повторіть дослід ще тричі.

▶▶

Опрацювання результатів експерименту

1. Обчисліть середній час руху кульки: $t_{\text{сер}} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) / 4$.
2. Обчисліть середнє значення прискорення кульки: $a_{\text{сер}} = 2s / t_{\text{сер}}^2$.
3. Обчисліть абсолютну та відносну похибки вимірювання (див. п. 4 § 2):
 - 1) часу: $\Delta t_{\text{сер}} = \frac{|t_1 - t_{\text{сер}}| + |t_2 - t_{\text{сер}}| + |t_3 - t_{\text{сер}}| + |t_4 - t_{\text{сер}}|}{4}$; $\varepsilon_t = \Delta t_{\text{сер}} / t_{\text{сер}}$;
 - 2) модуля переміщення: $\Delta s = \Delta s_{\text{прил}} + \Delta s_{\text{вип}}$; $\varepsilon_s = \Delta s / s$;
 - 3) модуля прискорення: $\varepsilon_a = \varepsilon_s + 2\varepsilon_t$; $\Delta a = \varepsilon_a \cdot a_{\text{сер}}$.
4. Округліть результати та запишіть результат вимірювання прискорення.

Номер до-сліду	Переміщення кульки s , м	Час руху кульки		Прискорення кульки $a_{\text{сер}}$, м/с ²	Похибка вимірювання прискорення		Результат вимірювання прискорення $a = a_{\text{сер}} \pm \Delta a$, м/с ²
		t_i , с	$t_{\text{сер}}$, с		відносна ε_a , %	абсолютна Δa , м/с ²	

□

Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент та його результати. Зробіть висновок, у якому зазначте: 1) величину, яку ви вимірювали; 2) результат вимірювання; 3) причини похибки; 4) вимірювання якої величини дає найбільшу похибку.

+

Творче завдання

Подумайте, від яких чинників залежить прискорення, з яким тіло скочується похилою площиною. Запишіть план проведення відповідного експерименту, проведіть його та зробіть висновок щодо правильності вашого припущення.



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема. Вивчення руху тіла по колу.

Мета: визначити характеристики рівномірного руху кульки по колу: період обертання, обертову частоту, лінійну швидкість, доцентрове прискорення й модуль рівнодійної сил, які надають кульці цього прискорення.

Обладнання: штатив із муфтою та лапкою, нитка завдовжки 50–60 см, аркуш паперу, циркуль, терези з важками, секундомір, кулька, лінійка, динамометр.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ



Підготовка до експерименту

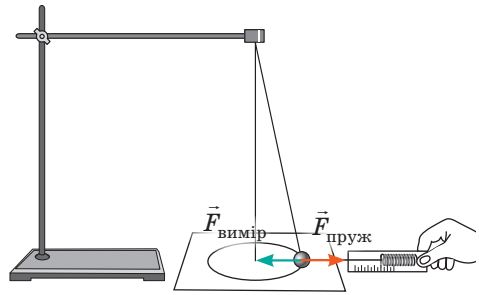
Нарисуйте на аркуші концентричні кола радіусами 8, 10, 11 см.



Експеримент

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

1. Виміряйте масу кульки.
2. Зберіть установку (див. рисунок).
3. Розкрутіть маятник так, щоб траєкторія руху кульки якомога точніше повторювала одне з кіл, зображених на папері. Виміряйте інтервал часу t , за який кулька здійснить 10 повних обертів.
4. Виміряйте модуль рівнодійної $\vec{F}_{\text{вимір}}$, зрівноваживши її силою $\vec{F}_{\text{пруж}}$ пружності пружини динамометра (див. рисунок).
5. Провідіть аналогічний дослід для решти кіл.



Опрацювання результатів експерименту

1. Визначте період обертання T , обертову частоту ν , лінійну швидкість v руху кульки: $T = \frac{t}{N}$; $\nu = \frac{N}{t}$; $v = \frac{2\pi R}{T}$.
2. Визначте модуль доцентрового прискорення кульки: $a_{\text{доц}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$.
3. Визначте модуль рівнодійної \vec{F} сил, які надають кульці, що рухається, доцентрового прискорення: $F = ma_{\text{доц}}$.
4. Порівняйте виміряне й обчислене значення рівнодійної сил, визначте відносну похибку експериментальної перевірки рівності $F = F_{\text{вим}}$ (див. п. 5 § 2).

Маса кульки m , кг	Радіус кола R , м	Час руху t , с	Кількість обертів N	Рівнодійна $F_{\text{вимір}}$, Н	Період обертання T , с	Обертова частота ν , с ⁻¹	Лінійна швидкість v , м/с	Доцентрове прискорення $a_{\text{доц}}$, м/с ²	Рівнодійна F , Н



Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому зазначте: 1) фізичні величини, які ви визначали; 2) точність проведеного експерименту та причини похибки.

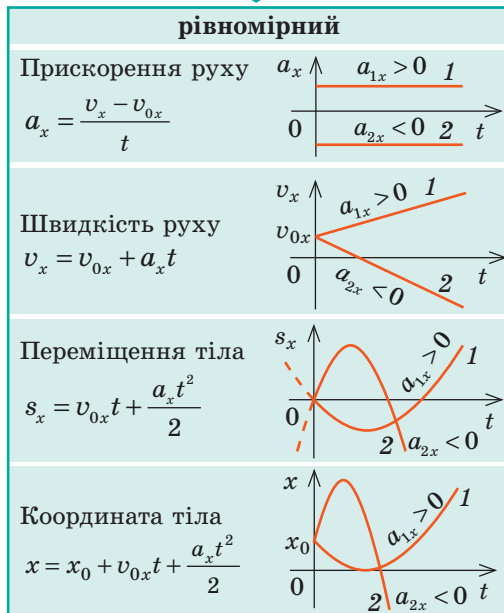
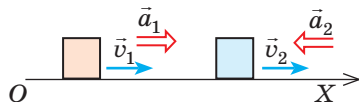
ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ I «МЕХАНІКА».

Частина 1. Кінематика

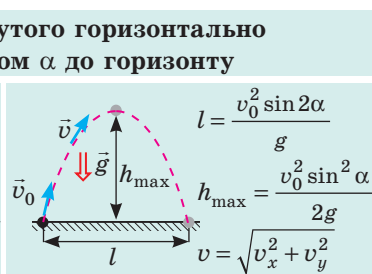
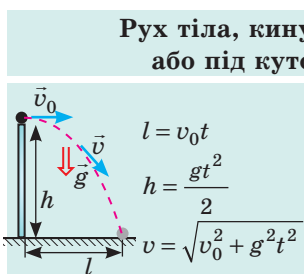
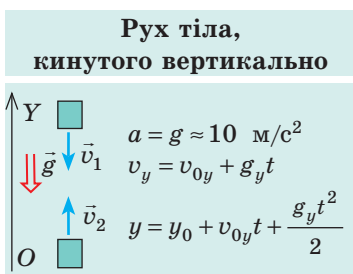
1. Вивчаючи кінематику, ви згадали про механічний рух та основні фізичні величини, які характеризують рівномірний прямолінійний і рівноприскорений прямолінійний рухи.

ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

Траєкторія руху — пряма.
Швидкість і прискорення напрямлені вздовж траєкторії руху тіла



2. Ви поглибили свої знання про рух тіла під дією сили тяжіння.

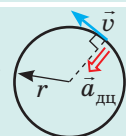


3. Ви вивчили рівномірний рух тіла по колу.

Рівномірний рух по колу

Період обертання: $T = t/N$; $[T] = \text{с}$ (секунда)
Кутова швидкість: $\omega = 2\pi/T$; $[\omega] = \text{рад/с}$ (с^{-1})
Лінійна швидкість: $v = 2\pi r/T = \omega r$; $[v] = \text{м/с}$
Доцентрове прискорення: $a_{\text{дц}} = v^2/r = \omega^2 r$; $[a_{\text{дц}}] = \text{м/с}^2$

Прискорення $\vec{a}_{\text{дц}}$ напрямлене до центра кола; швидкість \vec{v} — по дотичній до кола



ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I «МЕХАНІКА». Частина 1. Кінематика

Завдання 1–4 містять тільки одну правильну відповідь.

1. (1 бал) Ученицю можна вважати матеріальною точкою, коли вона:
 - а) робить зарядку; б) снідає; в) чистить зуби; г) йде до школи.
2. (1 бал) Тіло, кинуте під кутом до горизонту, рухається лише під дією сили тяжіння. Прискорення руху тіла:
 - а) найбільше в момент початку руху; б) однакове в будь-який момент руху; в) найменше в найвищій точці траєкторії; г) збільшується під час підйому.
3. (1 бал) Автомобіль рухається прямолінійною трасою. Яка ділянка графіка (рис. 1) відповідає руху з найбільшим прискоренням, якщо вісь OX напрямлена вздовж траси?
 - а) AB ; б) BC ; в) CD ; г) DE .
4. (2 бали) Малюк катається на каруселі, рухаючись колом радіуса 5 м. Якими будуть шлях l і модуль переміщення s малюка, коли диск каруселі виконає один повний оберт?
 - а) $l=0$, $s=0$; б) $l=31,4$ м, $s=0$; в) $l=0$, $s=5$ м; г) $l=31,4$ м, $s=5$ м.
5. (2 бали) Пасажирський потяг завдовжки 280 м рухається зі швидкістю 72 км/год. По сусідній колії в тому самому напрямку рухається зі швидкістю 36 км/год товарний потяг завдовжки 700 м. Протягом якого інтервалу часу пасажирський потяг пройде вздовж товарного потяга?
6. (3 бали) За графіком проекції швидкості руху автомобіля (див. рис. 1), визначте переміщення та середню шляхову швидкість руху автомобіля за перші 5 с спостереження.
7. (3 бали) Рух тіла задано рівнянням $x = 0,5 + 5t - 2t^2$ (м). Визначте переміщення тіла за перші 2 с руху; швидкість руху тіла через 3 с. Вважайте, що в обраній системі відліку тіло рухалося вздовж осі OX .
8. (3 бали) Із точки A , розташованій на висоті 2,75 м над поверхнею землі, вертикально вгору кинули м'яч зі швидкістю 5 м/с. Коли м'яч досяг найвищої точки свого підйому, із точки A із тією самою швидкістю кинули вгору другий м'яч. Визначте час і місце зіткнення м'ячів.
9. (4 бали) Каскадер перестрибує з одного даху на інший. Якою має бути найменша швидкість руху каскадера, якщо відстань між дахами становить 4,9 м? Якої найбільшої висоти сягне при цьому каскадер?
10. (4 бали) Тіло рухається вздовж осі OX із початковою швидкістю 4 м/с. Скориставшись графіком $x(t)$ (рис. 2): 1) запишіть рівняння координати; 2) побудуйте графік залежності $v_x(t)$.

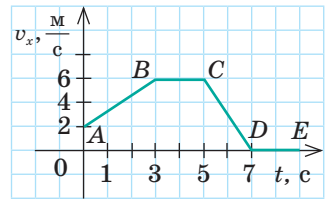


Рис. 1

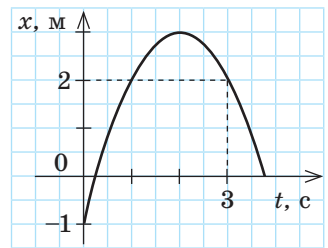


Рис. 2

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, виконані правильно, і полічіть суму балів. Поділіть цю суму на два. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».