

Володимир Сиротюк, Володимир Баштовий

ФІЗИКА

Підручник для 10 класу
загальноосвітніх навчальних закладів

Рівень стандарту

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України*

КИЇВ «ОСВІТА» 2010

ББК 22.3я721
С 40

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(Наказ Міністерства освіти і науки України
№ 544 від 08.06.2010 р.)

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

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

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

Експертизу підручника здійснювали:

Л. І. Ятвецька — зав. науково-методичної лабораторії Одеського
обласного інституту удосконалення вчителів;

Г. В. Мачушинець — методист районного методичного кабінету
відділу освіти Ківерцівської райдержадміністрації, Волинська обл.;

І. В. Грийцаровська — старший вчитель Зборівської ЗОШ І—ІІІ ст.
№ 1, Зборівський район, Тернопільська обл.;

В. В. Кумайгородський — вчитель-методист Чупирянського НВО
«Загальноосвітня школа І—ІІ ст. — дитячий садок», Білоцерківський
район, Київська обл.

Сиротюк В. Д.
С 40 **Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стан-
дарту)/В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий. — К.: Освіта, 2010. — 303 с.: іл.
ISBN 978-966-04-0818-0**

ББК 22.3я721

ISBN 978-966-04-0818-0

© В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий,
2010
© Видавництво «Освіта», 2010
© Видавництво «Освіта», художнє
оформлення, 2010

ЗМІСТ

ВСТУП

Зародження і розвиток фізики як науки	7
Роль фізичного знання в житті людини і розвитку суспільства	13
Методи наукового пізнання	16

МЕХАНІКА

Розділ 1. КІНЕМАТИКА

§ 1. Механічний рух тіл. Основна задача механіки та її розв'язання	20
§ 2. Фізичне тіло і матеріальна точка. Поступальний рух. Система відліку	21
§ 3. Відносність механічного руху	24
§ 4. Векторні і скалярні величини. Дії над векторами	25
<i>Задачі та вправи</i>	29
§ 5. Траєкторія руху. Шлях і переміщення	31
§ 6. Рівномірний прямолінійний рух. Швидкість руху тіла	34
§ 7. Закон додавання швидкостей	36
§ 8. Графічне зображення рівномірного прямолінійного руху	38
§ 9. Нерівномірний рух. Середня швидкість. Миттєва швидкість	41
<i>Задачі та вправи</i>	45
§ 10. Рівноприскорений прямолінійний рух тіла. Прискорення руху тіла	47
§ 11. Швидкість тіла і пройдений шлях під час рівноприскореного прямолінійного руху	49
§ 12. Графічне зображення рівноприскореного прямолінійного руху	50
<i>Загальні зауваження до виконання лабораторних робіт</i>	52
<i>Лабораторна робота № 1. Вимірювання прискорення тіла при рівноприскореному русі</i>	54
§ 13. Вільне падіння тіл. Прискорення вільного падіння	56
<i>Це цікаво знати</i>	58
<i>Задачі та вправи</i>	59
§ 14. Рівномірний рух тіла по колу. Лінійна і кутова швидкості. Період і частота обертання	63
§ 15. Доцентрове прискорення тіла	66
<i>Задачі та вправи</i>	68
Історична довідка	70
Перевірте свої знання	71
Контрольні запитання	71
Що я знаю і вмю робити	71
Тестові завдання	72

Розділ 2. ДИНАМІКА

§ 16. Механічна взаємодія тіл	80
§ 17. Сила. Вимірювання сил. Додавання сил	83
<i>Лабораторна робота № 2. Вимірювання сил</i>	86
§ 18. Перший закон Ньютона. Інерція та інертність	87
§ 19. Інерціальна система відліку. Механічний принцип відносності Галілея	90
§ 20. Другий закон Ньютона	95
§ 21. Третій закон Ньютона. Межі застосування законів Ньютона	98
<i>Задачі та вправи</i>	99
§ 22. Гравітаційна взаємодія. Закон всесвітнього тяжіння	105
<i>Це цікаво знати</i>	107
§ 23. Гравітаційна стала	108
§ 24. Сила тяжіння	109
§ 25. Рух тіл під дією сили тяжіння	112
§ 26. Вага тіла. Перевантаження і невагомість	114

<i>Це цікаво знати</i>	117
§ 27. Штучні супутники Землі. Розвиток космонавтики	118
<i>Задачі та вправи</i>	120
§ 28. Сила реакції опори. Сили пружності	124
§ 29. Сили тертя	125
<i>Задачі та вправи</i>	129
§ 30. Рівновага тіл	132
§ 31. Умова рівноваги тіла, що має вісь обертання. Момент сили	133
§ 32. Види рівноваги тіл	137
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження рівноваги тіла під дією кількох сил</i>	139
<i>Задачі та вправи</i>	140
§ 33. Імпульс тіла	142
§ 34. Закон збереження імпульсу. Реактивний рух	144
<i>Задачі та вправи</i>	147
§ 35. Механічна енергія. Кінетична і потенціальна енергія	150
§ 36. Закон збереження повної механічної енергії	155
<i>Задачі та вправи</i>	156
Історична довідка	161
Перевірте свої знання	163
<i>Контрольні запитання</i>	163
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	163
<i>Тестові завдання</i>	165

Розділ 3. РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА

§ 37. Основні положення спеціальної теорії відносності. Закон взаємозв'язку маси та енергії	174
§ 38. Відносність часу. Перетворення Лоренца. Швидкість світла у вакуумі як гранично допустима швидкість передавання взаємодії	176
§ 39. Розміри тіл та інтервали часу в різних системах відліку	179
<i>Задачі та вправи</i>	181
Історична довідка	183
Перевірте свої знання	184
<i>Контрольні запитання</i>	184
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	184
<i>Тестові завдання</i>	185

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Розділ 4. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ, РІДИН, ТВЕРДИХ ТІЛ

§ 40. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. Розміри атомів і молекул	189
§ 41. Рух атомів і молекул	190
§ 42. Взаємодія атомів і молекул	191
§ 43. Маса атомів і молекул. Кількість речовини	193
§ 44. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів	196
§ 45. Абсолютна температура. Рівняння стану ідеального газу	198
§ 46. Газові закони для ізопроцесів	200
<i>Лабораторна робота № 4. Дослідне підтвердження закону Бойля—Маріотта</i>	203
<i>Задачі та вправи</i>	204
§ 47. Пароутворення і конденсація. Насичена і ненасичена пара	208
§ 48. Залежність тиску насиченої пари від температури. Кипіння	210
§ 49. Вологість повітря. Методи вимірювання вологості повітря	213
<i>Лабораторна робота № 5. Вимірювання відносної вологості повітря</i>	216
§ 50. Властивості рідин. Поверхневий натяг рідини	218
§ 51. Змочування. Капілярні явища	221
§ 52. Будова і властивості твердих тіл. Кристалічні й аморфні тіла	222
§ 53. Види деформацій. Закон Гука	226
§ 54. Механічні властивості твердих тіл	231

§ 55. Рідкі кристали та їх властивості	233
§ 56. Полімери: їх властивості та застосування	235
<i>Задачі та вправи</i>	237
Історична довідка	241
Перевірте свої знання	242
<i>Контрольні запитання</i>	242
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	243
<i>Тестові завдання</i>	244

Розділ 5. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

§ 57. Внутрішня енергія тіл	252
§ 58. Два способи зміни внутрішньої енергії тіла	254
§ 59. Перший закон термодинаміки	255
§ 60. Робота термодинамічного процесу	256
§ 61. Теплові машини. Холодильна машина	259
<i>Задачі та вправи</i>	263
Історична довідка	266
Перевірте свої знання	267
<i>Контрольні запитання</i>	267
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	267
<i>Тестові завдання</i>	268

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Робота 1. Дослідження руху тіла, кинутого горизонтально	271
Робота 2. Визначення швидкості руху тіла за допомогою балістичного маятника	272
Робота 3. Дослідна перевірка закону Гей-Люссака	274
Робота 4. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу води	276
Робота 5. Визначення модуля пружності (модуля Юнга) гуми	277

УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

§ 62. Сучасні погляди на простір і час	279
§ 63. Взаємозв'язок класичної та релятивістської механіки	281

ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

Фізичні задачі навколо нас	282
Відповіді до задач і вправ	288
Відповіді до рубрики «Що я знаю і вмію робити»	292
Відповіді до рубрики «Фізичні задачі навколо нас»	293
Словник фізичних термінів	294
Предметно-іменний покажчик	300

Юні друзі!

Ви щойно відкрили підручник, з яким працюватимете протягом навчального року. Сподіваємося, він буде добрим помічником у вашій подорожі до країни знань та допоможе вам докладніше ознайомитися з явищами навколишнього світу.

У 10 класі ви будете вивчати основи кінематики і динаміки, молекулярно-кінетичну теорію і термодинаміку, а також ознайомитеся з основними законами і теоріями механіки, молекулярної фізики і термодинаміки. Теоретичний матеріал у пропонованому підручнику допоможе вам зрозуміти і пояснити відповідні процеси і явища, закони і теорії. Звертайте увагу на текст, виділений жирним шрифтом. Це фізичні терміни, визначення, важливі правила і закони, їх треба пам'ятати і вміти застосовувати.

Підручник містить у собі багато ілюстрацій, у ньому розглядаються досліди, які ви можете виконати самостійно або за порадами вчителя. Вони допоможуть глибше зрозуміти фізичний зміст явищ, що вивчаються. «Історична довідка» наприкінці кожного параграфа, без сумніву, розширить ваш кругозір.

Після кожного параграфа є запитання і завдання, відповіді на які допоможуть вам практично засвоїти викладений матеріал, закріпити формулювання. Частина з них має творчий характер і для відповіді потребує умінь аналізувати умови завдання, а також простежувати логічну послідовність і зв'язки у перебігу фізичних явищ.

У рубриці «Розв'язуємо разом» наведено алгоритми і зразки розв'язання найважливіших видів задач. Підручник містить у собі задачі, вправи і запитання різних рівнів складності: А — на закріплення, Б — творчого характеру.

Виконані вами лабораторні роботи і роботи фізичного практикуму збагатять вас поглибленим розумінням закономірностей фізичних явищ та вмінням ставити досліди і користуватися вимірювальними приладами.

Тим, хто хоче знати більше, стане в нагоді інформація, що вміщена у рубриці «Це цікаво знати».

Якщо вам знадобиться дізнатися про якийсь фізичний термін або правило, то скористайтеся «Словником фізичних термінів» і предметно-іменним покажчиком, що містяться наприкінці підручника.

Виконуючи спостереження і досліди з фізики, будьте уважними, додержуйтеся правил безпеки.

Намагайтеся бути максимально активними у засвоєнні матеріалу. Частіше обмінюйтеся думками щодо прочитаного зі своїми товаришами. Для з'ясування важких і спірних питань звертайтеся, у першу чергу, до вчителя, довідників та енциклопедій. Для перевірки правильності розуміння вивченого матеріалу корисно обговорювати повідомлення, доповіді учнів, розв'язки задач.

З самого початку налаштуйтеся на те, що вивчення фізики — це нелегка праця. Радість пізнання дається тільки як нагорода за перемогу над труднощами, її можна порівняти з радістю альпініста, який підкорив вершину. Виявіть працездатність, волю, і робота з підручником надасть вам немало радісних хвилин.

Щасливої вам дороги до знань!



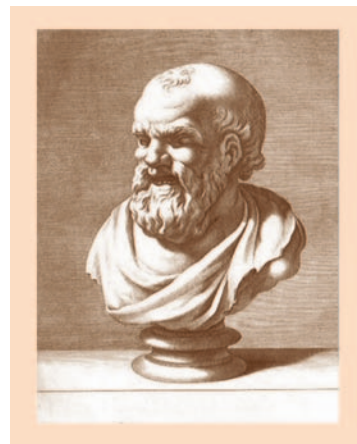
ВСТУП

- Зародження і розвиток фізики як науки
- Роль фізичного знання в житті людини і розвитку суспільства
- Методи наукового пізнання

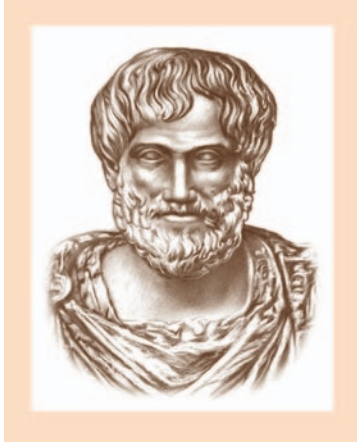
ЗАРОДЖЕННЯ І РОЗВИТОК ФІЗИКИ ЯК НАУКИ

Народи Вавілонії, Єгипту, Ассирії, Індії, Китаю за багато років нагромадили значний запас природничо-наукових і технічних знань. Свідченням цього є величні споруди Вавілона, унікальні єгипетські піраміди, іригаційні системи, різного роду військові колісниці, металеві машини і пристрої.

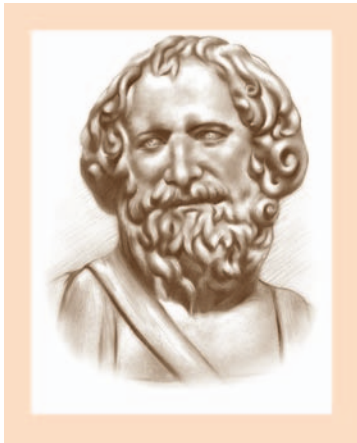
Новий етап у розвитку науки починається з середини I тисячоліття до нашої ери, коли на історичну арену виходить Стародавня Греція. Родоначальником першої грецької філософської школи був **Фалес із Мілета** (бл. 625—547 до н.е.), якого називали одним із семи мудреців стародавніх часів. Від нього беруть початок наші знання з електрики й магнетизму. Він описав властивість натертого бурштину (янтарю) притягати легкі тіла, а магніту — залізо. Його наступником був **Анаксимандр** (610—546 до н.е.), який висловив думку про єдність матеріального світу. **Геракліт із Ефеса** (594—475 до н.е.) стверджував, що все існує і у той же час не існує, бо все плине. Піфагорійці «надали геометрії характеру справжньої науки». **Ксенофан** (580—488 до н.е.), **Парменід** (V ст. до н.е.), **Зенон** (V ст. до н.е.) стверджували єдність світу, але разом з тим проголосили тезу про незмінність і нерухомість усього існуючого. Проти рухомості особливо відомі висловлювання Зенона. **Демокріт** (460—370 до н.е.) перший з наївно матеріалістичних позицій пояснив, що всі тіла



Демокріт



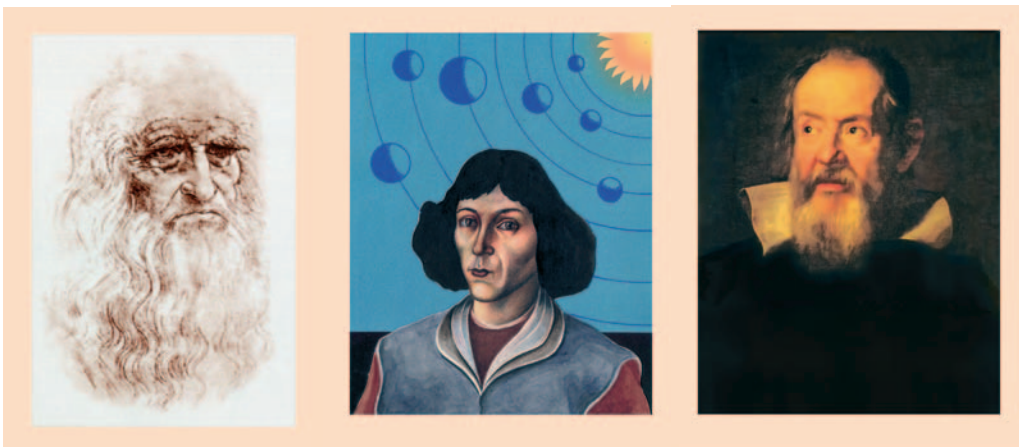
Арістотель



Архімед

складаються з найдрібніших матеріальних частинок — атомів, що немає нічого, крім атомів і порожнечі. Основна теза Демокріта — вічність і незнищуваність матерії. **Епікур** (341—270 до н.е.) стверджував, що всі тіла складаються з неподільних, щільних частинок, які розрізняються формою, вагою, розміром. Він також визнавав існування атомів і порожнечі, стверджував вічність матерії. Епікур узагальнив усі наукові досягнення свого часу і виклав їх у таких творах, як «Фізика», «Метафізика», «Метеорологія» тощо. Значний внесок у розвиток механіки зробив **Арістотель** (384—322 до н. е.). Він не тільки дав визначення механіки як науки, а й детально вивчав розбіжності тиску й удару, зробив важливий внесок у розв'язок задачі про важіль, увів поняття про два роди рухів — природні й вимушені, дав класифікацію руху тіл. **Архімед** (бл. 287—212 до н.е.) у дослідженнях значну увагу приділяв статиці.

У XIII ст. з'явився провісник нової експериментальної науки **Р. Бекон** (1214—1294), який стверджував, що істинне знання здобувається дослідно; сам багато експериментував, зокрема дізнався про склад пороху, досліджував властивості пари, винайшов способи одержання у чистому виді фосфору, магнію, вісмуту тощо. **М. Кузанський** (1401—1464) висловив думку про матеріальну єдність світу. Йому належать відомі досліди з вимірювання часу падіння



Леонардо да Вінчі

Міколай Коперник

Галілео Галілей

різних тіл: дерева, каміння, свинцевої кулі тощо. **Леонардо да Вінчі** (1452—1519) вважав найправильнішим дослідне вивчення природи, стверджуючи, що дослід був учителем тих, хто добре писав, і що мудрість — дочка досліду, бо тільки ґрунтуючись на ньому, можна дістати позитивні результати у дослідженні природи. **М. Коперник** (1473—1543) у своїх працях не лише відкинув систему світу Птолемея, а й запропонував нову, геліоцентричну систему. З цього часу розпочалася наукова революція у природознавстві. **Г. Галілей** (1564—1642), досліджуючи падіння різноманітних тіл, відкинув хибне твердження Арістотеля про залежність швидкості падіння тіл від їхньої ваги, доповнив і розвинув далі вчення Арістотеля про рух і розробив основи динаміки. **Ф. Бекон** (1561—1626) виклав основний метод пізнання природи — метод індукції. Він приділив велику увагу питанню експерименту як абсолютно необхідної умови при вивченні природи. **Р. Декарт** (1596—1650) дав чітке формулювання закону інерції і багато уваги приділив визначенню таких важливих понять, як маса, сила, тиск, удар тощо. Він вперше увів поняття про закон збереження кількості руху і сформулював його: «...коли одне тіло зіштовхується з іншим, воно не може надати йому ніякого іншого руху крім того, що втрачає під час цього зіштовхування, як не може і відняти у нього більше, ніж одночасно придбати собі».

Д. Бернуллі (1700—1782) вважається одним із найвидатніших фізиків і математиків свого часу. Так, Паризька академія десять разів присуджувала премії Д. Бернуллі за кращі дослідження з проблем математики і фізики. **Л. Ейлер** (1707—1783) написав понад 860 праць, які займають більше ніж 40 тис. друкованих сторінок. У 1736 р. у Петербурзі вийшла книга «Механіка, або наука про рух, викладена аналітично», яка стала важливою віхою у розвитку фізики. **Ж. Д'Аламбер** (1717—1783) сформулював загальний принцип динаміки системи — так званий принцип **Д'Аламбера**, за яким рух системи точок відбувається так, що в кожному момент часу втрачені сили й сили зв'язків взаємно врівноважуються. **Ж. Лагранж** (1736—1813) остаточно затвердив нові аналітичні методи у механіці і створив аналітичну динаміку системи матеріальних точок. **М. В. Ломоно-**



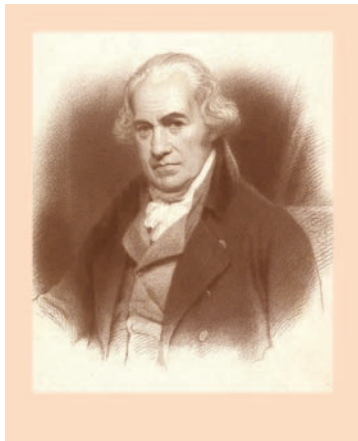
Данііл Бернуллі



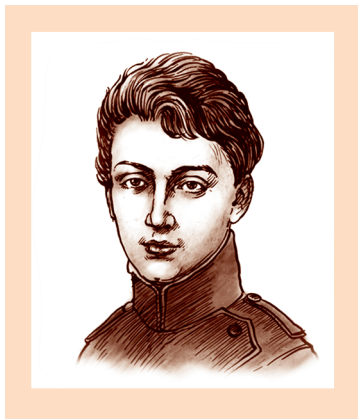
Михайло Васильович Ломоносов



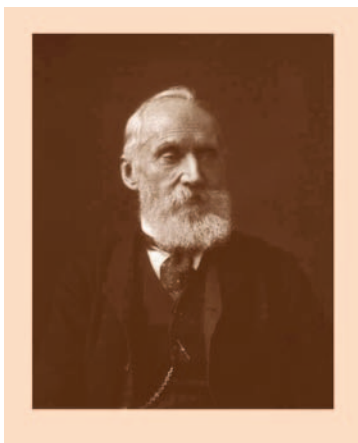
Рене Декарт



Джеймс Уатт



Саді Карно

Уільям Томсон
(лорд Кельвін)

сов (1711—1765) уперше розробив основи молекулярно-кінетичної теорії, пояснив природу теплоти, сформулював закони збереження руху і матерії тощо.

Д. Фаренгейт (1686—1736) у 1709 р. виготовив спиртові термометри, а в 1714—1715 рр. створив перші ртутні термометри з основними точками 0 і 212°. Р. Реомюр (1683—1757) описав винайдений ним спиртовий термометр, шкала якого між точкою танення льоду (взятою ним за 80°) і точкою кипіння води (0°) була поділена на 80 рівних частин. А. Цельсій (1701—1744) запропонував у 1742 р. термометричну шкалу з основними точками 0 і 100°. Г. Ріхман (1711—1753) виконав важливі експериментальні дослідження з визначення впливу температури, форми і поверхні тіл та швидкості руху охолоджувального середовища на теплообмін, обґрунтував закон охолодження тіла, дослідив процеси випаровування залежно від стану середовища, температури. А. Лавуазьє (1743—1794) і П. Лаплас (1749—1827) у 1783 р. запропонували калориметричний метод вимірювання теплоємностей тіл і у праці «Мемуари про теплоту» описали сконструйований ними калориметр.

Створені наприкінці XVII — на початку XVIII ст. (у 1690 р. французьким фізиком Д. Папеном (1647—1714), у 1698 р. англійським інженером Т. Севері (1650—1712) і, нарешті, у 1705 р. англійським винахідником Т. Ньюкоменом (1663—1729)) вогнедіючі пароатмосферні машини не могли задовольнити потреби суспільства через свою технічну недосконалість. У цих машинах парові двигуни були зроблені у комбінації з водяними колесами, які відігравали роль передавального механізму; вони були надто громіздкі, неекономічні і використовувалися лише для відкачування води з шахт. Першу парову машину універсальної дії, яка забезпечила практичне застосування теплоти для механічних потреб, сконструював видатний російський теплотехнік І. І. Ползунов (1728—1766). У 1784 р. універсальну парову машину розробив англійський винахідник Дж. Уатт (1736—1819), який вперше застосував у ній відцентровий регулятор з дросельною заслінкою для підтримування сталої

кількості обертів вала. Універсальна машина Уатта завдяки значній економічності почала широко використовуватися.

Виникнення термодинаміки було тісно пов'язане з практичними вимогами знайти раціональні основи для будівництва теплових двигунів. Вивчення робочих циклів теплових машин бере свій початок від 20-х років XIX ст., тобто з часу виходу в світ теоретичної праці молодого французького інженера **С. Карно** (1796—1832) «Міркування про рушійну силу вогню і про машини, що здатні розвивати цю силу» (1824). Праці С. Карно відіграли важливу роль у розвитку наукових основ теплотехніки. Стало зрозумілим, що для підвищення ККД теплових машин важливо йти шляхом розширення температурних меж, між якими проходить цикл робочого тіла, тоді як заміна одного робочого тіла іншим сама по собі не може дати ніякої користі. Проте Карно не зміг узагальнити елементарне формулювання другого начала термодинаміки на довільний оборотний коловий процес. Це зробили пізніше **Р. Клаузіус** (1822—1888) і **У. Томсон (лорд Кельвін)** (1824—1907). Дослідження С. Карно були продовжені в 1834 р. французьким інженером і фізиком **П. Клапейроном** (1799—1864), який застосував графічний метод — так званий метод індикаторних діаграм для графічного зображення робочих циклів. У 1834 р. Клапейрон вивів рівняння стану ідеального газу. Це рівняння узагальнив у 1874 р. **Д. І. Менделєєв** (1834—1907), який увів поняття універсальної газової сталої, розкрив її фізичну суть і записав рівняння стану ідеального газу для будь-якої маси. Це рівняння було назване рівнянням Клапейрона—Менделєєва.

Слід зауважити, що у першій чверті XIX ст. були встановлені, переважно дослідно, основні газові закони і запроваджені такі важливі поняття, як газова стала, питомі теплоємності газів, парціальний тиск газу тощо. У 1802 р. французький фізик **Ж. Гей-Люссак** (1778—1850) відкрив закон, згідно з яким коефіцієнт об'ємного розширення для всіх газів при сталому тиску однаковий і дорівнює $\frac{1}{273} \text{K}^{-1}$. Паралельно цим дослідженням фран-



Рудольф Клаузіус



Поль Клапейрон



Амадео Авогадро



Дмитро Іванович
Менделєєв



Джеймс Джоуль



Герман Гельмгольц

цузький фізик **Ж. Шарль** (1746—1823) встановив зв'язок між тиском газу, який займає сталий об'єм, і його температурою, причому і тут виявилось, що термічний коефіцієнт тиску однаковий для всіх газів і дорівнює $\frac{1}{273} \text{K}^{-1}$. Із закону Шарля неважко встанови-

ти існування температури, при якій майже припиняється рух молекул і яка дістала назву «абсолютний нуль». Абсолютний нуль, як відомо, лежить на $273,16^\circ$ нижче від 0° за шкалою Цельсія, і на його основі запроваджено нову шкалу температур, так звану абсолютну шкалу Кельвіна. У 1811 р. італійський фізик **А. Авогадро** (1776—1856) сформулював важливе для фізики твердження, яке було назване законом Авогадро.

40-ві роки XIX ст. посідають особливе місце в розвитку термодинаміки: вони ознаменовані цілою низкою фундаментальних досліджень, які привели до остаточного визначення першого начала термодинаміки. **Г. І. Гесс** (1802—1850) вивів важливий закон, згідно з яким тепловий ефект будь-якої хімічної реакції не залежить від шляху (проміжних стадій), а залежить тільки від вихідного і кінцевого станів системи. Дослідженнями, в яких було сформульовано принцип еквівалентності теплоти і роботи, виходячи із загальної ідеї про взаємоперетворюваність різних форм енергії, були праці німецького вченого **Р. Майєра** (1814—1878) «Про кількісне і якісне визначення сил» (1841) та «Замітки про сили неживої природи» (1842).

У 1843 р. російський фізик **Е. Х. Ленц** (1804—1865) опублікував працю «Про закони виділення теплоти гальванічним струмом», англійський фізик **Дж. Джоуль** (1818—1889) видав працю «Про тепловий ефект електромагнетизму і величину роботи теплоти», в яких було встановлено закон теплової дії електричного струму. Джоуль здійснив серію експериментів для визначення механічного еквівалента теплоти за допомогою механічної роботи сил тертя і визначив його числове значення. У 1847 р. видатний німецький природодослідник

Г. Гельмгольц (1821—1894) написав працю «Про збереження сил», в якій закон збереження і перетворення енергії набув строгої математичної форми. **У. Томсон** (1824—1907) поширив принцип Карно для процесів, які відбуваються в теплових машинах, на довільні явища, що пов'язані з тепловим рухом у макроскопічних тілах.

У наступне десятиліття, працюючи паралельно і незалежно, Томсон і особливо Клаузіус завершили створення класичної теорії другого начала термодинаміки, надавши йому сучасної математичної форми.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Назвіть давньогрецькі наукові школи, їх представників. Який внесок вони зробили в науку?
2. Розкажіть, як розвивалася механіка. Хто з учених зробив внесок у цю науку?
3. Дослідіть розвиток молекулярно-кінетичної теорії і термодинаміки.

РОЛЬ ФІЗИЧНОГО ЗНАННЯ В ЖИТТІ ЛЮДИНИ І РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА

Розвиток фізики, як зазначалося раніше, обумовлений соціальними процесами, загальним рівнем культури суспільства і потребами техніки. Розглянемо, як розвивалися фізичні знання і яку роль вони відігравали, на прикладі найважливіших фізичних відкриттів. Можна поставити таке запитання: *чи міг принцип відносності відкрити Арістотель*. За часів Арістотеля не було затишних кают корабля, як за часів Галілея, або плавно від'їжджаючих поїздів і відлітаючих літаків, як у наш час. Побудовані у той час суденця плавали під дією нерівномірних рухів веслярів у неспокійному Егейському морі. Зрозуміло, давньогрецький учений, що спирався лише на такого роду спостереження, не міг відкрити закон інерції і прийти до формулювання першого закону Ньютона. Отже, можна зробити висновок, що прогрес фізичної науки визначають умови життя і розвиток техніки.

За часів **І. Ньютона** (1643—1727) проблема динамічного обґрунтування руху планет Сонячної системи була чітко поставлена перед ученими як конкретне наукове завдання, і багато вчених того часу (**Р. Гук**, **Е. Галлей**, **Х. Гюйгенс**) працювали над пошуками його розв'язання. Успіх прийшов до **І. Ньютона**, який зрозумів, що планети є найбільш ідеальними об'єктами застосування законів руху. Результатом цього став закон всесвітнього тяжіння — найвище досягнення науки XVII ст.

Відкриття закону збереження і перетворення енергії було неминучим в епоху технічної революції, коли «на сцені» з'явилася «її величність — пара». Це було соціальне замовлення науці, яке вона виконала. Ось чому майже одночасно закон збереження і перетворення енергії відкрили незалежно один від одного представники найбільш розвинених на той час країн: у Франції — **С. Карно** (1832), у Німеччині — **Р. Майер** (1842) і **Г. Гельмгольц** (1847), в Англії — **Дж. Джоуль** (1843).

Відкриття електромагнітної індукції ми пов'язуємо з дослідженням цього явища **М. Фарадеєм**, але варто зауважити, що одночасно з ним електромагнітну індукцію відкрив американський фізик **Д. Генрі**, а

російський фізик **Е. Х. Ленц** встановив загальне правило визначення напрямку індукційного струму.

В оптиці епохальні відкриття хвильових властивостей світла зробили незалежно один від одного англієць **Т. Юнг** і француз **О. Френель**. Багато дослідників у всьому світі, спираючись на праці **Д. Максвелла** і **Г. Герца**, прагнули використовувати електромагнітні хвилі для практичних цілей, таким чином ідея радіо виникла у кількох учених одночасно. Перший радіоприймач було побудовано **О. С. Поповим**, і водночас з ним успіху досягли й інші учені-інженери, наприклад, **Г. Марконі**.

Спеціальна теорія відносності (СТВ) з'явилася не на порожньому місці. Вона виникла під час розв'язання так званої проблеми рухомих тіл, над якою, починаючи із середини XIX ст., працювало багато вчених, що прагнули виявити ознаки світлоносного середовища — так званого ефіру. Першим до кінця цю проблему вирішив **А. Ейнштейн** (1879—1955), але впритул до її розв'язання на початку XX ст. наблизились **Г. Лоренц** і **А. Пуанкаре**.

Закономірності наукових знань можна простежити також на прикладах з історії фізики, які показують діалектику випадковості і необхідності у розвитку фізичної науки.

Наприклад, «випадковими» фізичними відкриттями є: відкриття **Л. Гальвані** електричного струму в тілі тварин; виявлення **Х. Ерстедом** магнітної дії електричного струму; відкриття рентгенівських променів; виявлення **Беккерелем** радіоактивного випромінювання; відкриття **Г. Герцем** явища фотоефекту. «Випадковим» було і відкриття фізиком **П. А. Черенковим** випромінювання світла електронами, рухомими у середовищі зі швидкостями, що перевищують швидкість світла у цьому середовищі.

Проте слід зазначити, що «випадковість» цих відкриттів полягала в непередбачуваності, незапланованості кожного з них, але всі вони з'явилися як наслідок напруженої творчої діяльності вчених-дослідників.

Фізичні знання мають також прикладну цінність. Відкриття **Архімеда**, **Галілея**, **Торрічеллі**, **Ньютона**, **Карно** та інших становлять наукові досягнення у рівній мірі і як теоретичні висновки, і як практичні запровадження для задоволення потреб техніки і виробництва. І в наші дні фізика залишається основним знаряддям технічного прогресу. Слід звернути увагу і на такий бік розвитку науки: і в минулому, і сьогодні наука, що виникла з потреб виробництва і попиту людей, часто випереджає їх. Наукові ідеї, що зароджуються в учених, можуть довгі роки чекати практичної реалізації. Проілюструвати цю думку допоможуть такі приклади. **Винахід Герона** (еоліпил Герона) у Стародавній Греції не отримав будь-якого розвитку (сам Герон демонстрував винайдену ним парову турбіну як цікаву іграшку) і не мав впливу на розвиток науки і техніки перш за все тому, що не було потреби в індустріальному розвитку; мускульна сила рабів цілком задовольняла всі запити рабовласницького суспільства.

І. Ньютон у книзі «Математичні начала натуральної філософії» писав про можливість запуску штучних супутників: «Якщо свинцеве ядро, кинуте горизонтально силою пороху з гармати, поставленої на вершині гори, відлетить по кривій, раніше ніж впасти на Землю, на дві милі, то, припускаючи, що немає опору повітря, якщо його кинути з подвійною швидкістю, воно відлетить приблизно удвічі далі, якщо з десятикратною,

то — далі вдсятеро. Збільшуючи швидкість, можна за бажанням збільшувати дальність польоту і зменшувати кривизну лінії, якою ядро рухається, так, що можна було б змусити його впасти на відстані і десяти градусів, і тридцяти, і дев'яноста, можна було б змусити його оперізати Землю або навіть піднятися в небесні простори і продовжувати віддалятися до нескінченності. Подібно до того, як кинуте тіло може відхилитися силою тяжіння так, щоб описувати орбіту навколо Землі, так і Місяць... силою тяжіння може відхилитися від прямолінійного шляху і змушений обертатися своєю орбітою...» І. Ньютон розраховував також першу космічну швидкість, при якій забезпечується орбітальний рух супутників Землі, і вказав, що такі супутники обертатимуться тривалий час тільки за межами атмосфери (тобто врахував опір повітря). Тому цілком природним буде запитання: *чому в XVII ст. все ж таки не було запущено штучний супутник і цей великий проект чекав своєї реалізації аж до 4 жовтня 1957 року.*

Слід звернути увагу й на те, що і сьогодні низка наукових ідей чекає свого підтвердження і використання для блага людини: ефект уповільнення часу (спеціальна теорія відносності), який дозволяє оптимістично дивитися на космічні подорожі до інших зоряних систем і дає можливість «потрапити» у майбутнє; розгадка природи гравітації і використання антигравітації; використання термоядерної енергії у мирних цілях, що дозволить ліквідувати таку насущну проблему людства, як «енергетичний голод» тощо.

Важливо також вказати на глибокий взаємозв'язок фізики й техніки. Розвиток техніки сприяє проведенню фізичних досліджень і, навпаки, відкриті вченими нові явища або закони стають потужним стимулом для розвитку техніки. Так, відкриття явища електромагнітної індукції привело до створення цілого прикладного напрямку у фізиці — електрофізики, яка потім відокремилася від фізичної науки в самостійну галузь технічних знань — електротехніку. Подібну закономірність виникнення нових технічних напрямів з відповідних галузей фізики можна простежити при вивченні багатьох розділів шкільного курсу фізики. Наприклад, рівняння Максвелла → радіофізика → радіотехніка; геометрична і фізична оптика → оптичні прилади → оптична техніка і промисловість; явище індукованого випромінювання → квантова електроніка → лазерна техніка; ядерні реакції → ядерна фізика → ядерна енергетика тощо.

Отже, наука, а зокрема і фізика, є однією з головних продуктивних сил суспільства, яка проникає в усі галузі людської діяльності. Різко скорочуються терміни між фізичним відкриттям і його технічним і практичним втіленням (для порівняння можна навести такі факти: від відкриття явища електромагнітної індукції (1831) до промислового отримання змінного струму пройшло близько 50 років; від відкриття Максвеллом електромагнітних хвиль (1864) до використання їх у радіо — 35 років; відкриття реакції поділу важких ядер (1938) було реалізоване в атомній техніці вже через 5 років, а одне з величезних наукових досягнень епохи науково-технічної революції (НТР) — створення лазерів — практично відразу ж (через 2 роки) привело до розвитку могутньої лазерної техніки і використання її в усіх галузях науки і виробництва). Фізичні дослідження і технічні винаходи в епоху НТР мають тенденцію зливатися, так що не

можна сказати, яким саме науковим результатом — теоретичним чи практичним — є, наприклад, такі досягнення, як синхрофазотрон, атомний реактор, лазер, транзистор, комп'ютерна техніка, нові види зв'язку, розвиток нанотехнологій тощо.

Варто було б поставити ще одне запитання: *чи може «закінчитися фізика як наука», тобто чи можуть бути зроблені всі фізичні відкриття.* У такому випадку припинився б і прогрес техніки. Її рівень залишався б тим самим, і з часом вона стала б відставати від загального соціально-культурного розвитку людства. Однак така ситуація неможлива, вона суперечить закону розвитку людської цивілізації, який також строго виконується і є об'єктивним, як і закони фізики.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Чим зумовлений розвиток фізичних знань?
2. Як впливає розвиток фізики на розвиток техніки і навпаки? Відповідь обґрунтуйте прикладами.
3. Доповніть відомості про роль знань з фізики в житті людини і суспільному розвитку.

МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ

Про дослід як метод вивчення природи ви знаєте з основного курсу фізики. Шляхом узагальнення даних дослідів були сформульовані **фізичні поняття**, наприклад такі, як механічний і тепловий рухи, газ, рідина, тверде тіло тощо; введені **фізичні величини** для характеристики властивостей фізичних об'єктів: швидкість руху тіла, маса і об'єм тіла, тиск газу, температура тіла тощо; сформульовані **емпіричні** (отримані з дослідів) **закони**, наприклад закон **Паскаля** для рідин і газів, закон **Джоуля—Ленца** та ін.

Метод, який дає змогу одержати нові знання за допомогою проведення дослідів (експерименту), називають експериментальним.

Цей метод — один із основних способів отримання наукових знань. Він найбільш часто застосовується в школі на уроках фізики. Проте важливо мати на увазі, що дослід, які проводяться на уроках або вдома, — це навчальні дослід. Вони відрізняються від дослідів, які проводяться в наукових лабораторіях.

Науковому експерименту передують обґрунтована **гіпотеза**. Вона визначає мету і зміст експерименту. Вимірювання проводяться у строго визначених умовах, дані вимірювань точно обробляються. Експеримент завершується оцінкою похибки отриманого результату.

У науковому експерименті вчені ставлять природі запитання, відповідь на яке наперед невідома. Для одержання надійних висновків дослід зазвичай повторюється багаторазово. Це приводить до того, що тривалість наукового експерименту часто вимірюється роками, а іноді й десятками років. Наприклад, дослід Джоуля з вимірювання відношення між роботою і кількістю теплоти продовжувалися з 1839 до 1850 року, а потім були повторені у 1878 році.

Дослід не може бути єдиним джерелом знань. **Спостереження**, наприклад, показують нам, що Сонце сходить і заходить, а Земля перебуває у

стані спокою. Повсякденні спостереження показують, що важке тіло падає швидше, ніж легке, що без дії сили тіла не можуть рухатися. Наука, як відомо, за істинні приймає твердження, що суперечать цим безпосереднім спостереженням.

Дані дослідю повинні бути осмислені і відтворені у системі наукових понять і законів. Тому поряд з дослідом як метод вивчення природи виступає **теорія** (з грецької *теорія* — наукове пізнання, дослідження; використання цього терміна правомірне тільки у застосуванні до науки).

Теорія узагальнює дані дослідів на основі мислення, збагачує їх і робить новими, більш глибокими знаннями. Теорія виходить за межі безпосереднього (чуттєвого) сприйняття і ставить завдання знайти об'єктивно існуючі закономірності. Видатний учений **Д. І. Менделєєв** говорив, що «...сила науки полягає у теоретичному мисленні. Якщо немає теоретичного узагальнення, то наші знання ще не є наукою, силою, а вони є рабством перед тим, що вивчається».

Експеримент часто проводиться для того, щоб підтвердити або відкинути теорію. Однак сам по собі експеримент, якщо він не пов'язаний з певними теоретичними передбаченнями, не має наукової цінності. Деякі експериментальні відкриття, наприклад відкриття електризації, у свій час ніяк не вплинули на розвиток фізики тому, що не була підготовлена теоретична база.

Експериментальний метод дає результати тільки у поєднанні з теоретичним.

Теорія систематизує дані дослідів на основі певних узагальнень, ідей. Вона слугує засобом отримання нових знань і вказує шляхи практичного використання відкритих закономірностей. Критерієм правильності висновків теорії є дослід, практика.

Процес розвитку знань, таким чином, іде від дослідю (спостереження, експеримент) до абстрактного мислення — теорії, а потім до практики.

Наукові знання являють собою єдність **емпіричного** і **теоретичного**. Проте у пізнанні звичайно виділяють два рівні — емпіричний і теоретичний. Поділ цих рівнів пізнання відображає різницю у методах пошуку знань. Емпіричне дослідження містить у собі дослід як засіб отримання фактів і виявлення зовнішніх зв'язків, емпіричне узагальнення фактів, формування емпіричних понять і емпіричних законів. Теоретичні знання містять у собі, по-перше, систему вихідних теоретичних понять, принципів (з латинської *принципium* — початок, основа; принципами називають судження, які узагальнюють дані дослідю і слугують основними положеннями будь-якої теорії) і гіпотез; по-друге, сукупність висновків, наслідків (умовиводів), які одержують з основних положень за допомогою логічних і математичних викладів.

Вихідні поняття, принципи або гіпотези становлять **основу теорії**. В основі термодинаміки, наприклад, лежать поняття і два принципи (начала) термодинаміки — термодинаміка як теорія, що побудована на основі принципів. Молекулярно-кінетична теорія будується на іншій основі — на основі гіпотез про молекулярну будову тіл і про властивості молекул. Ці гіпотези задають модель (механічну аналогію) властивостей системи молекул, тому говорять, що молекулярно-кінетична теорія будується на основі модельних гіпотез. Принципи або гіпотези, покладені в основу теорії, являють собою узагальнення дослідних даних — спостережень, експе-

рименту, виробничої практики. Однак в узагальненні дослідних даних міститься елемент теоретичного знання: як принципи, так і гіпотези не виводяться безпосередньо й однозначно з досліду. Для знаходження принципів і гіпотез одних даних досліду недостатньо.

Другу частину теоретичного знання, як уже зазначалося, становить система висновків, отриманих з основних положень за допомогою логічних висновків і математичних виведень, — система математичних співвідношень між фізичними величинами, які відображають властивості фізичних об'єктів. Відповідність цих висновків даним досліду слугує підтвердженням правильності вихідних положень теорії. Висновки з основних положень у тій або іншій теорії можуть бути одержані різними прийомами. Прийоми, що дають змогу отримати нові знання, слугують методами дослідження в рамках теорії. З термодинаміки, наприклад, ми дізнаємося про метод кругових процесів, із молекулярно-кінетичної теорії — про статистичний метод.

Фізична теорія правильно відображає природу явищ, які вона описує, якщо її застосовувати в тій сфері, для вивчення якої вона створена. Будь-яку теорію не можна вважати тотожною природі. Теорія — це відображення, картина реальних фізичних явищ, але відображення в єдності і цілісності, у системі. Її завдання, як вважав **Л. Больцман**, — слугувати скеровуючим початком для теоретичної думки й експерименту, бути способом пояснення і способом руху людської думки до істини.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які ви знаєте методи наукового пізнання світу?
2. Що таке теорія? Яку роль відіграє гіпотеза у наукових дослідженнях?
3. Доведіть значення наукового експерименту.

Частина 1

МЕХАНІКА





Розділ 1 КІНЕМАТИКА

- Механічний рух тіл. Основна задача механіки та її розв'язання
- Фізичне тіло і матеріальна точка. Поступальний рух. Система відліку
- Відносність механічного руху
- Векторні і скалярні величини. Дії над векторами.
- Траєкторія руху. Шлях і переміщення
- Рівномірний прямолінійний рух. Швидкість руху тіла
- Закон додавання швидкостей
- Графічне зображення рівномірного прямолінійного руху
- Нерівномірний рух. Середня швидкість. Миттєва швидкість.
- Рівноприскорений прямолінійний рух тіла. Прискорення руху тіла
- Швидкість тіла і пройдений шлях під час рівноприскореного прямолінійного руху
- Графічне зображення рівноприскореного руху
- Вільне падіння тіл. Прискорення вільного падіння
- Рівномірний рух тіла по колу. Лінійна і кутова швидкості. Період і частота обертання
- Доцентрове прискорення тіла

§ 1 МЕХАНІЧНИЙ РУХ ТІЛ. ОСНОВНА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ ТА ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

Фізика розглядає різноманітні природні явища, з якими ви вже ознайомилися в основній школі: механічні, теплові, електричні, оптичні. У старшій школі вивчатимемо їх детальніше, враховуючи вже набуті вами знання з фізики і математики. Розпочнемо з розгляду механічного руху як одного з найважливіших для практики і найпростіших для сприйняття фізичних явищ.

Усі тіла навколо нас у будь-який момент часу мають певне розташування у просторі. Якщо з часом положення тіл змінюється, то кажуть, що тіла рухаються.

Механічний рух — зміна положення тіла або його частин у просторі відносно інших тіл з часом.

Розділ фізики, в якому пояснюється механічний рух матеріальних тіл, а також взаємодії, які відбуваються при цьому між ними, називають **механікою**.

Термін «механіка» вперше ввів Арістотель, в перекладі з грецької він означає *машина* або *пристрій*.

Щоб вивчити рух тіла, треба дослідити, як змінюється його положення в просторі з часом, тобто вміти визначати його координати в будь-який момент часу. Так, астрономи, знаючи закони руху небесних тіл, можуть розраховувати з великою точністю, наприклад, появу в певний момент у певній ділянці неба комети.

Основна задача механіки полягає у визначенні положення тіла в будь-який момент часу.

Така задача має єдиний розв'язок тільки за конкретних початкових умов, тобто коли відомі початкове положення (координати) тіла і початкова швидкість його руху. Розв'язок основної задачі механіки математично подається у вигляді певної функції (залежності) координат тіла від часу.

У цьому розділі ми будемо досліджувати тільки просторові (геометричні) характеристики механічного руху тіла, його траєкторію, координати та швидкість, не враховуючи маси тіла та причин, які змінюють стан його руху.

Розділ механіки, в якому вивчають рухи матеріальних тіл без урахування мас цих тіл і сил, що на них діють, називають **кінематикою**.

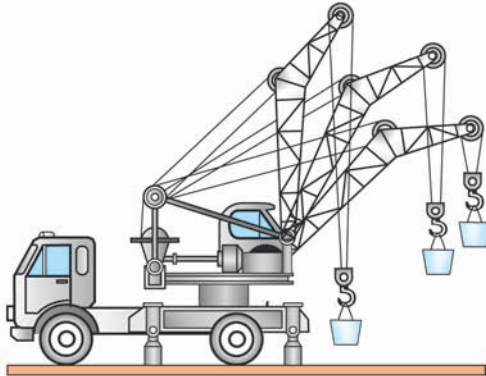
Отже, щоб розв'язати основну задачу механіки, насамперед треба з'ясувати, які існують різновиди руху та їх характеристики.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке механічний рух?
2. Сформулюйте завдання механіки як розділу фізики.
3. У чому полягає основна задача механіки та розв'язання її в кінематиці?
4. Що вивчає кінематика?

§ 2 ФІЗИЧНЕ ТІЛО І МАТЕРІАЛЬНА ТОЧКА. ПОСТУПАЛЬНИЙ РУХ. СИСТЕМА ВІДЛІКУ

Під час дослідження руху якогось тіла постає завдання визначити його положення у просторі у певні моменти часу. Наприклад, ми хочемо описати рух каменя, який кинули в річку. Камінь має певні розміри і форму, складається з величезної кількості молекул (атомів), під час польоту він безладно обертається, окремі його точки рухаються по-різному. Щоб описати детально рух такого тіла, треба дослідити рух усіх його частинок — це настільки складна задача, що на її розв'язання не вистачить обчислювальних потужностей і часу.



а



б



в

Мал. 1

випадків далі у нашому курсі вважатимемо рухомі тіла матеріальними точками. Зрозуміло, що задача опису механічного руху тіл дуже спроститься.

Проте у фізиці часто задачу, залежно від її умов, можна розв'язати наближено і отримати цілком задовільний результат. Для цього замість реального тіла розглядають його спрощену ідеальну **модель**, тобто об'єкт, у якому нехтують несуттєвими для даної задачі властивостями заданого тіла, залишаючи лише його основні, визначальні риси.

Якщо камінь у наведеному прикладі до падіння у воду подолав відстань, значно більшу за його розміри, то вони не будуть суттєво впливати на характер його руху й у граничному випадку тіло можна вважати точкою.

Крім того, на рух тіла не впливають його атомна структура, теплові, електричні, оптичні властивості тощо. Для опису тіла, а пізніше і причин цього руху, досить, щоб геометрична точка мала масу, що дорівнює масі даного тіла, і могла рухатись. Таку ідеальну модель реального тіла називають **матеріальною точкою**.

Матеріальною точкою є тіло, розмірами якого за даних умов руху можна знехтувати.

У наведеному визначенні дуже важливі слова «за даних умов руху», які виражають обмеженість застосування даного поняття. **Матеріальна точка — поняття відносне, а не абсолютне.** Одне й те саме тіло в одній задачі можна розглядати як матеріальну точку (рух космічного корабля на орбіті, рух океанського лайнера, які є малими порівняно з шляхами, що вони долають), а в іншій — як тіло скінченних розмірів і певної форми (стикування одного космічного корабля з іншим). У більшості

У наведених вище прикладах усі точки рухомого тіла рухалися по-різному. Але на практиці дуже часто тіла рухаються так, що всі їх точки рухаються однаково. Однаково рухаються точки кузова автомобіля на прямій ділянці дороги, різця токарного верстата, вантажу на канаті підйомного крана (мал. 1, а), кабінок колеса огляду (мал. 1, б), поршня у циліндрі двигуна автомобіля, шухляди, що витягують зі столу, санчат, що спускаються з гори, голки швейної машини, ручки під час письма (мал. 1, в) тощо.

Рух тіла, під час якого всі його точки рухаються однаково, називають **поступальним**.

Коли тіло рухається поступально, будь-який виділений напрям у тілі, наприклад, пряма вздовж планки висувної шухляди, залишається паралельний своєму положенню в будь-який момент часу. Іншими словами, тіло при поступальному русі *не обертається*. Зрозуміло, що під час дослідження поступальних рухів досить описати рух лише однієї точки тіла, що також значно спрощує розв'язання основної задачі механіки.

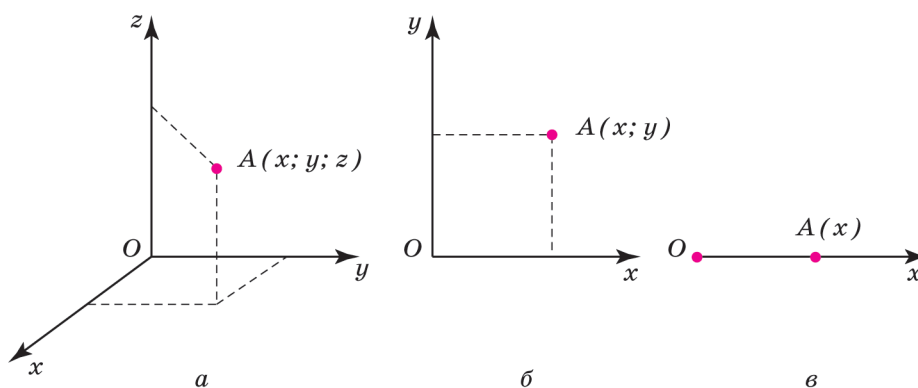
Місцезнаходження досліджуваного тіла під час руху можна визначити, вказавши його розташування відносно іншого тіла.

Тіло, відносно якого визначають положення інших тіл у різні моменти часу, називають **тілом відліку**.

Для визначення положення тіла відносно тіла відліку математично користуються певною системою координат. За початок декартової системи координат беруть довільну точку тіла відліку, з якою жорстко пов'язують осі системи. Користуючись одиничним масштабом, можна визначити координати x , y , z будь-якої точки простору, відкладаючи масштаб у напрямі координатних осей. Положення кожної точки в просторі визначається трьома координатами (мал. 2, а), на площині — двома (мал. 2, б), на прямій — однією (мал. 2, в).

Якщо точка рухається відносно тіла відліку, то потрібно знати не тільки де, а й коли вона перебуває у відповідному місці. Отже, для одержання повної інформації про рух тіла (точки), треба вміти вимірювати час. Час вимірюють, використовуючи будь-який перебіг рівномірного періодичного процесу, наприклад хід годинника.

Тіло відліку, з яким пов'язана система координат, і годинник для вимірювання часу, утворюють **систему відліку**.



Мал. 2



Мал. 3

Наведемо приклад системи відліку, яка відрізняється від описаної вище. Щоб виявити місцезнаходження літака, радіолокатор посилає сигнал і через час t приймає відбитий сигнал (мал. 3). Відстань до літака обчислюється за формулою $l = c \frac{t}{2}$, де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — стала швидкість сигналу.

Місцезнаходження літака відносно радіолокатора в цьому разі визначається також трьома координатами: відстанню до літака l і двома кутами, які визначають за розташуванням антени під час вимірювань, — кутом азимуту на пряму на літак

відносно напрямку на північ і кутом між горизонталлю та напрямком на літак.

Під час руху положення тіла змінюється відносно системи координат, тобто з часом змінюються і значення координат певної точки тіла. Розглянемо, як у фізиці визначають зміну фізичної величини з часом. Наприклад, координати точки, відлічені вздовж осей координат у момент часу, який взяли за початковий ($t_0 = 0$), дорівнювали відповідно x_0 , y_0 , z_0 . Через певний інтервал часу $t - t_0$ (або просто t , оскільки $t_0 = 0$) вони змінилися і набули значень x , y , z . Це означає, що за час t координата x змінилася на $(x - x_0)$, координата y — на $(y - y_0)$, координата z — на $(z - z_0)$. Кожна з різниць $x - x_0$, $y - y_0$, $z - z_0$ є також фізичною величиною — **зміною** координат x , y , z за відповідний інтервал (зміну) часу $t - t_0$. Щоб визначити **зміну будь-якої фізичної величини, треба від її кінцевого значення відняти її початкове значення**.

Часто застосовують скорочений запис зміни фізичної величини за допомогою знака Δ (грецька літера дельта), який пишуть перед позначенням змінюваної фізичної величини, наприклад: $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, $\Delta z = z - z_0$, $\Delta t = t - t_0$.

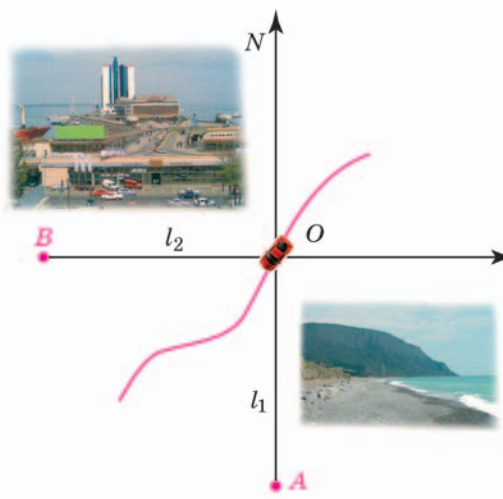
? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. З якою метою в механіці користуються ідеальними моделями?
2. Що розуміють під матеріальною точкою? Чи можна сказати, що це просто дуже маленьке тіло?
3. В яких випадках застосовують поняття матеріальної точки?
4. Які ознаки поступального руху?
5. Коли в механіці під час дослідження руху можна обмежитись описом руху однієї точки?
6. Чим розрізняються між собою тіло відліку і система відліку?
7. Що таке зміна фізичної величини? Як її визначають?

§ 3 ВІДНОСНІСТЬ МЕХАНІЧНОГО РУХУ

Досліджуючи механічний рух, тіло відліку можна вибирати довільно, але звичайно його вибирають з міркувань зручності, щоб опис руху мав найпростіший вигляд. Зокрема можна розглядати кілька різних тіл, з кож-

ним з яких пов'язана своя система прямокутних координат з довільним орієнтуванням осей. Це дає можливість одночасно розглядати положення одного тіла в різних системах координат. Зрозуміло, що в різних системах координат положення того самого тіла може бути зовсім різним. Наприклад, місцезнаходження автомобіля на шляху можна визначити, зазначивши, що він знаходиться на відстані l_1 на північ від населеного пункту A (мал. 4). Водночас можна сказати, що автомобіль знаходиться на відстані l_2 на схід від пункту B . Це означає, що **положення тіла відносно: воно різне відносно різних тіл відліку і пов'язаних з ними систем координат.**



Мал. 4

З відносності положення тіла випливає також **відносність будь-якого механічного руху. У чому ж вона полягає?**

Вибране тіло буде рухатись по-різному відносно інших тіл: людина, яка їде в потязі, відносно Землі рухається, а відносно вагона потяга перебуває в стані спокою. Літаки, що летять групою, один відносно одного знаходяться в стані спокою, відносно Землі рухаються з великою швидкістю, наприклад $900 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, відносно такої ж групи літаків, що рухаються у зворотному

напрямі, вони рухаються зі швидкістю $1800 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Будь-який механічний рух і, зокрема, стан спокою тіла є відносним.

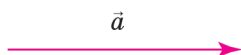
Відповідаючи на запитання, рухається тіло чи знаходиться в стані спокою, необхідно вказати, відносно яких тіл розглядається рух цього тіла. Безглуздо і неможливо розглядати якийсь «абсолютний рух» тіла або «рух взагалі», безвідносно до певного тіла відліку.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

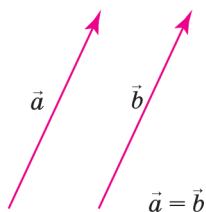
1. У чому полягає відносність механічного руху?
2. Як визначити, рухається тіло чи перебуває у стані спокою?
3. Поясніть, хто перебуває в русі: пасажир, який їде в автобусі, чи людина, яка стоїть на автобусній зупинці?
4. Що насправді рухається: Земля навколо Сонця чи Сонце навколо Землі?

§ 4 ВЕКТОРНІ І СКАЛЯРНІ ВЕЛИЧИНИ. ДІЇ НАД ВЕКТОРАМИ

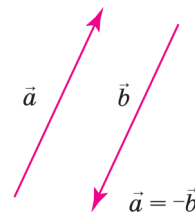
Фізичні величини, що характеризують фізичну систему і її стани (наприклад, взаємодію і механічний рух тіл) відображаються відповідними



Мал. 5



Мал. 6



Мал. 7

математичними об'єктами. Наприклад, щоб задати масу, температуру, об'єм тіла, треба визначити тільки їх числові значення у певних одиницях. Щоб задати силу або швидкість, треба обов'язково знати, крім числового значення, ще і їхній напрям у просторі, від чого залежить перебіг самого явища.

Фізичні величини, які виражають тільки числом, називають **скалярними** або **скалярами**.

Математичні дії із скалярними величинами здійснюють за відомими вам правилами арифметики.

Фізичні величини, які характеризують числовим значенням, напрямом і геометричним способом додавання, називають **векторними** або **векторами**.

Числове значення вектора називають модулем вектора. Модуль вектора — величина скалярна й додатна. Векторну фізичну величину зображують стрілкою, довжина якої у вибраному масштабі дорівнює модулю вектора, а напрям збігається з напрямом фізичної величини (мал. 5). Якщо модуль вектора дорівнює нулю, то вектор зображається точкою.

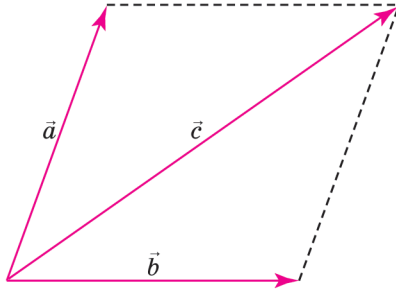
Позначають вектори напівжирними літерами, наприклад, \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , або світлими літерами зі стрілками над ними: \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} .

Модуль вектора позначають або за допомогою математичного знака модуля $|\vec{a}|$, $|\vec{b}|$, $|\vec{c}|$, або просто світлими літерами a , b , c . Надалі користуватимемося цим останнім позначенням модуля вектора.

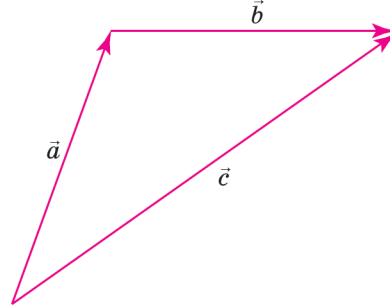
Вектори \vec{a} і \vec{b} є рівними, якщо вони мають однакові модулі і напрями (мал. 6). Вектори можна помножити на скаляр. Якщо помножити вектор \vec{a} на скаляр k , то отримаємо вектор \vec{p} такого самого напрямку, як у вектора \vec{a} , з модулем, що дорівнюватиме добутку модуля вектора \vec{a} на скаляр k : $\vec{p} = k\vec{a}$. Якщо вектор \vec{a} помножити на (-1) , то його модуль залишиться таким самим, а напрям зміниться на протилежний. Якщо вектори \vec{a} і \vec{b} рівні за модулем і мають протилежні напрями, то їх називають **протилежними** і записують так: $\vec{a} = -\vec{b}$ (мал. 7).

Математичні вектори можна переносити паралельно самим собі, з фізичними векторами це можна робити не завжди (наприклад, у задачах на рівновагу, коли дія важеля залежить від точки прикладання вектора сили).

Вектори можна додавати за правилами *геометричного*, або *векторного*, *додавання*. Якщо додати вектори \vec{a} і \vec{b} , то отримаємо вектор їхньої суми \vec{c} , таку дію записують у вигляді векторної рівності: $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$. Щоб визначити напрям і довжину (модуль) вектора суми \vec{c} користуються такими правилами.



Мал. 8



Мал. 9

Правило паралелограма. Якщо вектори \vec{a} і \vec{b} мають спільний початок, то для їх додавання треба побудувати на цих векторах (як на сторонах) паралелограм (мал. 8), діагональ якого буде вектором суми векторів \vec{a} і \vec{b} . Якщо в цьому паралелограмі від кінця вектора \vec{a} до кінця вектора \vec{b} провести другу діагональ, то вона дорівнюватиме вектору різниці векторів $\vec{a} - \vec{b}$ (перевірте це для вправи).

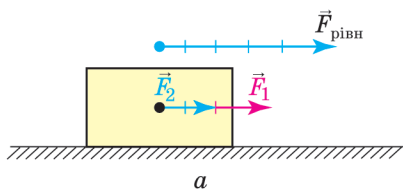
Якщо вектори \vec{a} і \vec{b} не мають спільного початку, то їх можна за допомогою паралельного перенесення привести до спільного початку.

Правило трикутника. Паралельним перенесенням вектора \vec{b} сумістити його початок із кінцем вектора \vec{a} , тоді вектором суми $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ буде вектор, що з'єднує початок вектора \vec{a} і кінець вектора \vec{b} (мал. 9). Правило трикутника еквівалентне правилу паралелограма, але його зручно застосовувати, коли треба додавати декілька векторів. Також за цим правилом неважко отримати різницю векторів $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$. Перепишемо цю рівність у вигляді $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{b})$, бачимо, що віднімання вектора еквівалентне додаванню протилежного йому вектора $(-\vec{b})$, що неважко зробити.

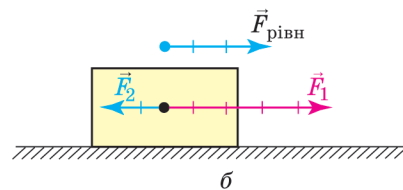
Коли вектори напрямлені вздовж однієї прямої або паралельні, їх називають **колінеарними**. Колінеарні вектори можуть бути напрямлені в один бік, або в протилежні боки. Ви стикалися з обома випадками у 8 класі, коли визначали рівнодійну сил, прикладених до тіла, що діяли вздовж однієї прямої (мал. 10, а, б).

Колінеарні вектори додаються так само, як і **неколінеарні**, які ми розглядали вище. Задача у цьому разі значно спрощується, результат вам добре відомий: за модулем результуючий вектор дорівнює або арифметичній сумі (коли вектори напрямлені в один бік), або арифметичній різниці

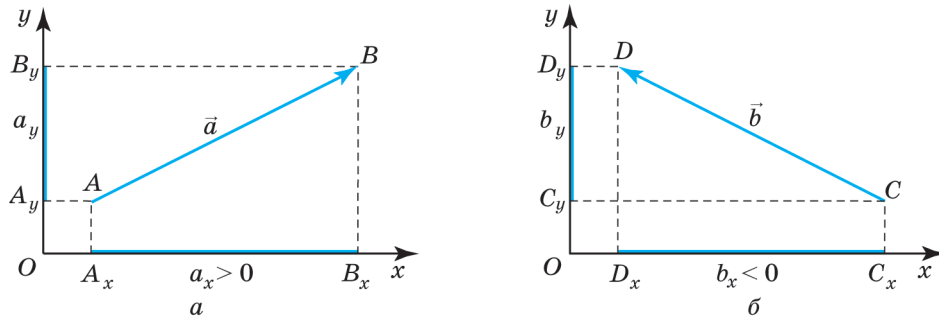
$$F_{\text{рівн}} = F_1 + F_2$$



$$F_{\text{рівн}} = F_1 - F_2$$



Мал. 10



Мал. 11

(коли вектори напрямлені протилежно) модулів векторів, що додаються. Результуючий вектор у першому випадку напрямлений так само, як і складові, у другому — у бік більшого за модулем вектора.

Рівняння механіки, як побачимо далі, мають зручну і наочну векторну форму, але під час обчислень ми оперуємо числами (скалярами), тому під час розв'язання задач виникає потреба перейти від векторного до скалярного запису. Для цього ознайомимось з поняттям проекції вектора на координатну вісь і правилами дій з проекціями векторів.

Вам добре відомо з геометрії поняття проекції точки на пряму (вісь).

Проекцією точки на пряму (вісь) називають основу перпендикуляра, опущеного з цієї точки на пряму.

Зрозуміло, що оскільки відрізок складається із послідовної і безперервної сукупності точок, то **проекція відрізка на вісь складатиметься із проекцій усіх його точок на цю вісь; це буде відрізок на осі, обмежений проекціями початку і кінця даного відрізка.**

На мал. 11, *a*, *б* зображені вектори \vec{a} і \vec{b} , по-різному орієнтовані відносно осей координат. Проекції точок і відрізків позначаються їхніми символами з нижнім індексом осі. Наприклад на мал. 11, *a*, A_x , B_x — проекції початку і кінця вектора \vec{a} на вісь Ox ; на мал. 11, *б*, C_y , D_y — проекції початку і кінця вектора \vec{b} на вісь Oy . Визначаючи проекцію вектора на вісь, треба враховувати, що знак проекції залежатиме від орієнтації цього вектора відносно осі.

Проекцію вектора на обрану вісь вважають додатною, якщо від проекції початку вектора до проекції його кінця треба рухатися у напрямі цієї вісі.

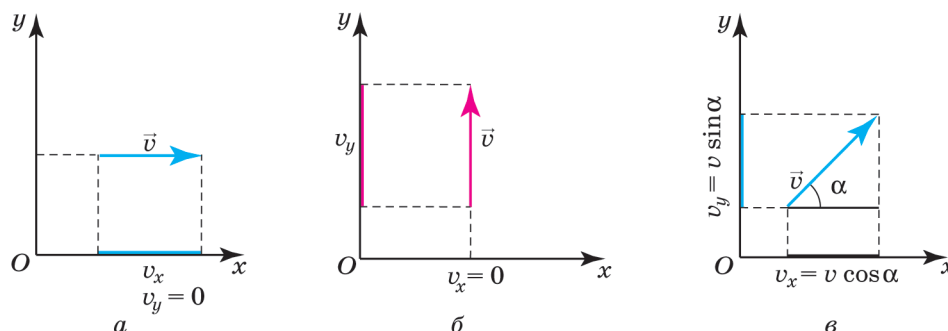
Проекцію вектора на обрану вісь вважають від'ємною, якщо від проекції початку вектора до проекції його кінця треба рухатися у напрямі, протилежному на пряму цієї вісі.

Відповідно до цих правил проекція вектора \vec{a} на вісь Ox буде додатною, тобто $a_x > 0$, а проекція вектора \vec{b} на вісь Ox — від'ємною, тобто $b_x < 0$.

Якщо відомі проекції кількох векторів на певну вісь, то, користуючись наведеними правилами і правилами додавання векторів, неважко визначити проекцію суми векторів на цю вісь.

Проекція вектора суми векторів на певну вісь дорівнює сумі проекцій векторів-доданків на цю вісь.

Якщо $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, то $c_x = a_x + b_x$, і $c_y = a_y + b_y$. Перевірте це самостійно.



Мал. 12

Ви бачите, що на площині векторному рівнянню відповідають два скалярних рівняння. Значення проєкцій векторів залежать від їх розташування відносно системи координат, тому під час розв'язання задач намагаються вибирати напрями координатних осей таким чином, щоб спростити математичні перетворення і обчислення.

На мал. 12, а—в показано різні випадки орієнтації вектора швидкості тіла \vec{v} відносно осей координат. У загальному випадку вектор \vec{v} напрямлений під кутом α до осі Ox (мал. 12, в) і його проєкції визначатимуться за формулами тригонометрії: $v_x = v \cos \alpha$ і $v_y = v \sin \alpha$. Якщо вектор \vec{v} напрямлений паралельно осі Ox , то, як видно з мал. 12, а, модулі вектора і його проєкції збігаються. При перпендикулярному розташуванні вектора \vec{v} відносно осі Ox (мал. 12, б) проєкції його початку і кінця на цю вісь збігаються і модуль проєкції дорівнює нулю.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Чим відрізняються векторні величини від скалярних?
2. Наведіть приклади векторних і скалярних величин.
3. За якими правилами додаються вектори?
4. Як знайти проєкції векторів на координатні осі?

Задачі та вправи

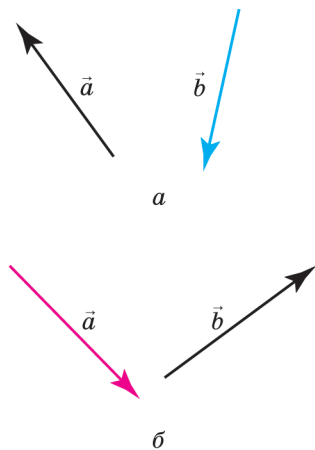
Розв'язуємо разом

1. В яких з наведених нижче прикладах досліджуване тіло можна вважати матеріальною точкою: а) обчислюють тиск трактора на ґрунт; б) визначають висоту підйому ракети; в) розраховують роботу, виконану під час піднімання залізобетонної плити перекриття відомої маси на задану висоту; г) обчислюють масу сталеві кульки, користуючись мензуркою?

В і д п о в і д ь: у випадках «б» і «в».

2. Коли літак летить над хмарами, то пасажиром іноді здається, що літак падає вниз на хмари, чого насправді немає. Чим це пояснити?

В і д п о в і д ь: насправді хмари внаслідок конвекції піднімаються вгору і здається, ніби літак падає вниз.



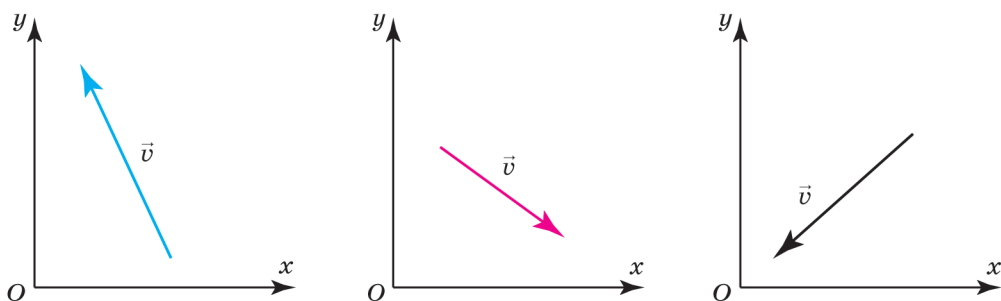
Мал. 13

Рівень А

- Які рухи є рівномірними, а які — нерівномірними: а) рух літака на зльоті; б) спускання на ескалаторі метрополітену; в) рух поїзда при наближенні до станції?
- Яким буде рух колеса автомобіля, коли за ним спостерігатиме людина, що сидить у цьому автомобілі біля вікна?
- Наведіть приклади задач, в яких Місяць: а) можна вважати матеріальною точкою; б) не можна вважати матеріальною точкою.
- Чи можна вважати Землю матеріальною точкою, визначаючи: а) відстань від Землі до Сонця; б) шлях, пройдений Землею по орбіті навколо Сонця за місяць; в) довжину екватора; г) швидкість руху точки екватора під час добового обертання Землі навколо осі; г) швидкість руху Землі по орбіті навколо Сонця?
- Чи може людина, яка знаходиться на рухомому ескалаторі, бути у стані спокою в системі відліку, пов'язаній із Землею?
- Додайте вектори за правилами трикутника і паралелограма (мал. 13, а, б).

Рівень В

- Велосипедист, що рухається по дорозі, крутить педалі. Який при цьому рух педалей — поступальний чи обертальний?
- Чи можна вважати матеріальною точкою снаряд під час розрахунку: а) дальності польоту снаряда; б) форми снаряда, яка забезпечує зменшення опору повітря?
- Чи можна вважати матеріальною точкою залізничний состав довжиною приблизно 1 км під час розрахунку шляху, пройденого за кілька секунд?
- Чому в літаку під час польоту, дивлячись в ілюмінатор на безхмарне небо, ми не відчуваємо, що літак летить?



Мал. 14

11. Швидкість штормового вітру $30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а швидкість руху автомобіля досягає $150 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Чи може автомобіль рухатися так, щоб перебувати у спокої відносно повітря?
12. Швидкість руху велосипедиста $36 \frac{\text{км}}{\text{год}}$, а швидкість вітру $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Яку швидкість має вітер у системі відліку, пов'язаній з велосипедистом, коли: а) вітер зустрічний; б) вітер попутний?
13. Знайдіть проекції векторів на координатні осі (мал. 14).

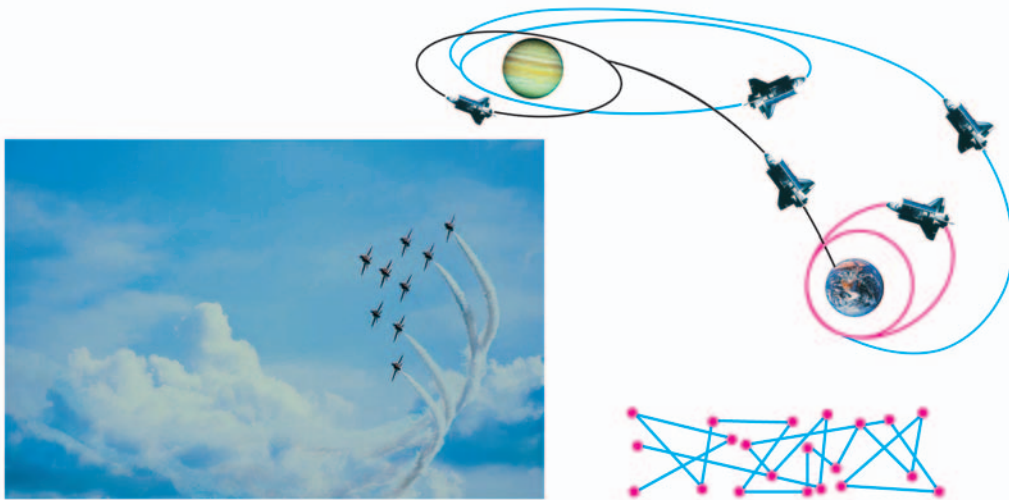
§ 5 ТРАЕКТОРІЯ РУХУ. ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ

Матеріальна точка під час механічного руху з часом послідовно займає різні положення у просторі, кожному з яких відповідають значення координат у заданій системі відліку. Неперервна сукупність точок, що визначаються цими координатами, утворює у просторі уявну лінію-траєкторію, вздовж якої рухалося тіло.

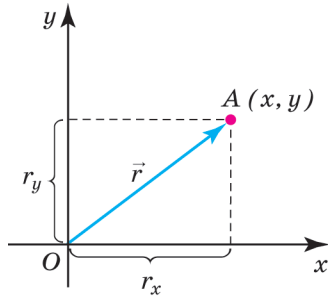
Траєкторією руху точки називається уявна лінія, яку описує тіло під час руху.

Траєкторія — це слід, який залишає тіло під час свого руху, найчастіше — невидимий, інколи — видимий (слід від велосипедних коліс на сухому асфальті після подолання калюжі), інколи — заздалегідь заданий (залізничні або трамвайні колії). За формою траєкторії механічні рухи бувають **прямолінійними** (траєкторія — пряма лінія) і **криволінійними**, коли тіло рухається вздовж довільної кривої (мал. 15). За траєкторією легко визначити **шлях**, пройдений тілом під час руху, — досить виміряти довжину траєкторії.

Шлях — це довжина траєкторії, яку описало рухоме тіло (матеріальна точка) за певний інтервал часу.



Мал. 15



Мал. 16

Шлях є скалярною фізичною величиною, оскільки не має визначеного напрямку і характеризується лише значенням. Шлях позначають латинською літерою l . У Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею шляху є **один метр (1 м)**.

На практиці знання шляху, який пройшло рухоме тіло, дає змогу визначити, наприклад, час і кількість пального, що потрібні для його подолання, але цього не досить для визначення положення тіла наприкінці руху. Отже, це можна зробити, якщо відомі напрями, у яких перебувало тіло на початку і наприкінці руху, а також відстані до нього від тіла відліку в ці моменти. Знаємо, що число і напрям характеризують вектор, отже, ми прийшли до доцільності векторного опису механічного руху. Переваги такого опису полягають у його математичній наочності, крім того, такий спосіб задання положення тіла не залежить від орієнтації системи координат у просторі.

На мал. 16 точка A з координатами x, y відповідає положенню рухомої матеріальної точки на площині, а напрямлений відрізок \vec{r} , що з'єднує початок координат і точку A , визначає відстань матеріальної точки від тіла відліку і напрям на неї.

Вектор, проведений з початку системи відліку в дану точку, називають **радіус-вектором** цієї точки.

Такий векторний спосіб задання місцеположення точки у просторі відповідає наведеному раніше прикладу про визначення положення літака радіолокатором (мал. 3).

Якщо з кінця радіус-вектора опустити перпендикуляри на осі координат, то можна визначити проєкції радіус-вектора \vec{r} на ці осі: r_x — проєкція радіус-вектора \vec{r} на вісь Ox , r_y — проєкція радіус-вектора \vec{r} на вісь Oy . На мал. 16 добре видно, що знайдені проєкції збігаються з координатами точки A :

$$r_x = x, r_y = y.$$

Якщо точка A рухається певною траєкторією, то довжина і напрям вектора \vec{r} будуть відповідно змінюватися. На мал. 17 \vec{r}_0 — це радіус-вектор матеріальної точки в початковий момент руху, а \vec{r} — радіус-вектор цієї точки у кінцевий момент руху, він показує, де перебуватиме тіло через час руху t .

Тоді, щоб визначити **зміну** в положенні тіла за час руху, треба, як ви вже знаєте, знайти різницю між векторами \vec{r} і \vec{r}_0 за правилом трикутника. Це буде вектор \vec{s} , що з'єднує кінці цих векторів, він напрямлений до кінця вектора \vec{r} :

$$\vec{r} - \vec{r}_0 = \Delta\vec{r} = \vec{s}. \quad (1.1)$$

Вектор \vec{s}_1 , проведений з початкового положення матеріальної точки до її кінцевого положення, називають **переміщенням** цієї точки за певний час

Переміщення — дуже важлива фізична величина, **що показує, на яку відстань і в якому напрямі змістилося тіло за даний час**. Знаючи, як переміщення змінюється з часом, можна розв'язати основну задачу для будь-якого механічного руху. Як видно на мал. 17, якщо відомі радіус-вектор початкового положення тіла \vec{r}_0 , переміщення тіла \vec{s} за час t , то радіус-век-

тор \vec{r} кінцевого положення тіла можна визначити векторним додаванням цих векторів:

$$\vec{r} + \vec{r}_0 = \vec{s}. \quad (1.2)$$

Отриманий вираз називають **рівнянням** будь-якого механічного руху у векторній формі, тут поточний радіус-вектор і переміщення — функції часу: $\vec{r} = \vec{r}(t)$ і $\vec{s} = \vec{s}(t)$. Цей загальний векторний розв'язок основної задачі механіки дуже наочний, але ним не можна скористатися для безпосереднього обчислення координат тіла у будь-який момент часу. Для цього його треба переписати у проекціях на осі координат, оскільки проекція вектора — це скаляр. Вираз у проекціях на координатну вісь буде мати такий самий вигляд, як і векторний вираз, але замість векторів треба записати відповідні проекції на осі координат. На мал. 17 маємо дві осі координат, отже, наша векторна рівність розпадається на дві скалярні рівності (два рівняння руху) — для осей Ox і Oy :

$$\begin{aligned} x &= x_0 + s_x, \\ y &= y_0 + s_y, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де x_0, y_0, x, y — проекції радіус-векторів \vec{r} і \vec{r}_0 , які дорівнюють відповідним координатам їх кінців, s_x і s_y — проекції переміщення \vec{s} відповідно на осі Ox і Oy . Якщо початкові координати x_0, y_0 перенести у ліву частину цих рівностей, то одержимо вирази для проекцій переміщення:

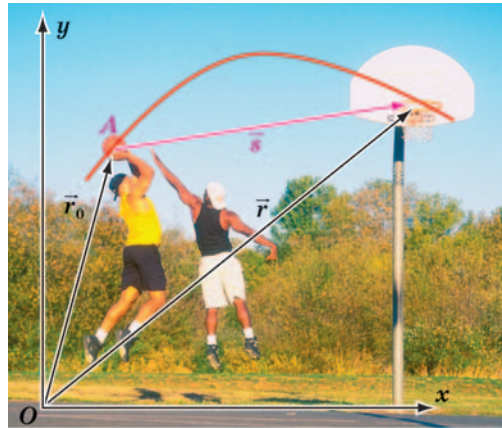
$$s_x = x - x_0 = \Delta x, \quad s_y = y - y_0 = \Delta y. \quad (1.4)$$

Проекції переміщення \vec{s} на осі координат Ox і Oy дорівнюють змінам координат тіла x і y .

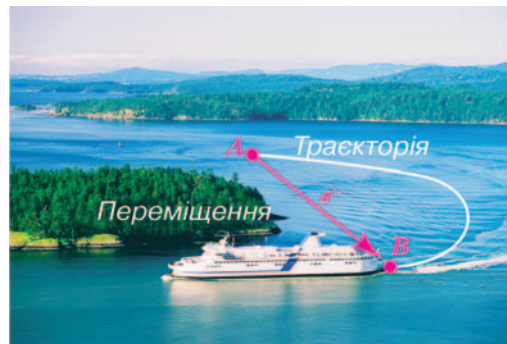
Одержані скалярні вирази вже дають змогу, знаючи початкові координати точки і залежність проекцій переміщення від часу, обчислювати координати точки для будь-якого моменту. Надалі якраз і будемо вивчати залежності проекцій переміщення від часу для різних видів механічного руху, тобто знаходити рівняння руху для конкретних видів руху.

На мал. 18 показано криволінійну траєкторію, яку тіло описало, рухаючись із точки A в точку B , і відповідне переміщення. Видно, що довжина (модуль) переміщення у загальному випадку менша за пройдений тілом шлях за певний інтервал часу. Тільки, якщо тіло рухається вздовж прямої і весь час в один бік, то пройдений ним шлях дорівнює модулю переміщення.

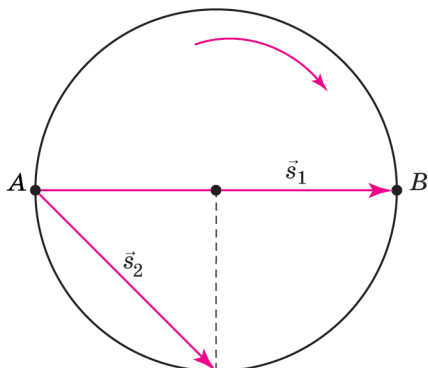
В процесі руху шлях, пройдений тілом, із часом може тільки зростати, а переміщення, залежно від виду руху, з часом може зростати, зменшуватися



Мал. 17



Мал. 18



Мал. 19

і навіть набувати нульового значення. Це буває, коли тіло, рухаючись, повертається у точку, з якої починало рух. Прикладом може бути рух тіла по колу (мал. 19). Як ми бачимо, під час руху тіла із точки A в точку B за годинниковою стрілкою модуль його переміщення на початку збільшується, поки не набуде максимального значення (діаметра кола), а потім зменшується і набуває нульового значення у точці початку руху.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке траєкторія руху?
2. Чи залежить траєкторія руху тіла від системи відліку?
3. Що таке пройдений шлях?
4. Що називають радіус-вектором точки?
5. Що називають переміщенням тіла?
6. Як за переміщенням визначити положення тіла під час руху?
7. Чим відрізняється переміщення від пройденого шляху?
8. Чому дорівнює переміщення годинникової стрілки за добу? за 2 год?
9. Коли пройдений шлях і переміщення будуть однаковими? Наведіть приклади.
10. Які переваги векторного опису механічного руху?

§ 6 РІВНОМІРНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. ШВИДКІСТЬ РУХУ ТІЛА

У 8 класі ви вивчали, що прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух, при якому тіло за будь-які однакові інтервали часу проходить однаковий шлях. Дамо інше визначення названого руху і з'ясуємо певні відмінності.

Прямолінійним рівномірним рухом називається рух, при якому тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.

Якщо за деякий інтервал часу Δt здійснюється переміщення $\Delta \vec{s}$, то за подвоєний інтервал часу $2\Delta t$ переміщення є подвоєним $2\Delta \vec{s}$, за потроєний інтервал часу $3\Delta t$ — потроєним $3\Delta \vec{s}$ і т. д. Іншому значенню Δt відповідає інше $\Delta \vec{s}$, але відношення переміщення до часу $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ буде таке саме. Отже, з

означення рівномірного прямолінійного руху випливає, що відношення $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ не залежить від значення інтервалу часу Δt .

У подібних випадках кажуть, що розглядувана величина $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ незмінна, інваріантна щодо зміни Δt . Інваріантні в різних розуміннях величини роз-

глядають у фізиці як об'єктивні характеристики фізичних процесів або властивостей.

Оскільки переміщення $\Delta \vec{s}$ — величина векторна, а час Δt — величина скалярна, відношення $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ є вектор. Для даного рівномірного прямолінійного

руху вектор $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ характеризує переміщення тіла за одиницю часу. Ця векторна величина є основною характеристикою прямолінійного рівномірного руху і називається **швидкістю руху тіла**.

Швидкість прямолінійного рівномірного руху — це векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Напрямок швидкості рівномірного прямолінійного руху збігається з напрямом переміщення тіла.

Зазначимо, що в формулі для обчислення швидкості Δt можна брати будь-яким, а $\Delta \vec{s}$ має відповідати взятому Δt . Тоді формула буде мати такий вигляд:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}, \quad (1.6)$$

де \vec{s} — переміщення тіла; t — час руху тіла.

За одиницю швидкості руху тіла у фізиці вибирають відповідно до формули швидкість такого рівномірного руху, в якому тіло за одиницю часу здійснює переміщення, значення якого дорівнює одиниці довжини. У Міжнародній системі одиниць (СІ) незалежними є одиниця довжини метр (1 м) і одиниця часу секунда (1 с). Одиницею швидкості руху тіла в СІ є **один метр за секунду (1 м/с)**.

Під час розв'язання задач векторні фізичні величини, що характеризують рух тіла, як зазначалось раніше, записують у проекціях на відповідну вісь, тобто:

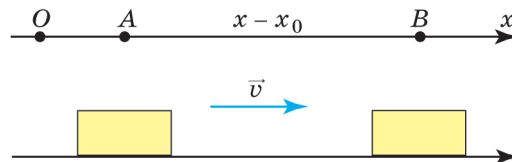
$$v_x = \frac{s_x}{t}, \quad (1.7)$$

звідки $s_x = v_x t$.

Проекція вектора на вісь — це відрізок осі між проекцією початку і кінця вектора на цю ж вісь. Вона може бути додатною, якщо напрями вектора і вибраної осі збігаються, від'ємною, якщо ці напрями не збігаються, дорівнювати нулю, якщо вектор перпендикулярний до осі.

Отже, знаючи проекцію швидкості руху тіла, за формулою можна знайти проекцію його переміщення за будь-який інтервал часу. Якщо тіло не змінювало напрям руху, то модуль переміщення (у даному разі його проекція) дорівнює пройденому шляху: $s_x = l$.

Припустимо, що тіло рухається вздовж певної прямої (мал. 20).



Мал. 20

Напрямимо вздовж цієї прямої одну з координатних осей, наприклад вісь Ox .

Якщо за певний час t тіло перемістилося з точки A , координата якої дорівнює x_0 , у точку B з координатою x , то можна сказати, що тіло здійснило додатне переміщення, довжина якого дорівнює $s_x = x - x_0$. Проекція швидкості на вісь Ox у даному випадку також є додатним числом $v_x = v$, оскільки швидкість завжди напрямлена в той самий бік, що й переміщення, тому можна записати: $x - x_0 = vt$, або

$$x = x_0 + vt . \quad (1.8)$$

Якщо переміщення напрямлене у протилежний бік, то проекції переміщення і швидкості виражатимуться від'ємними числами і тоді отримуємо

$$x = x_0 - vt . \quad (1.9)$$

З формул $x = x_0 + vt$ і $x = x_0 - vt$ бачимо, що для знаходження положення тіла в будь-який момент часу (в даному випадку воно визначається координатою x) слід знати початкове положення тіла (координату x_0) і швидкість його руху.

Зробимо висновок: для розв'язання основної задачі механіки, тобто визначення положення тіла в будь-який момент часу, необхідно знати обидві характеристики його швидкості — напрям і числове значення.

Під час рівномірного прямолінійного руху тіла в один бік довжина його переміщення (числове значення або модуль) дорівнює пройденому шляху. Проте на відміну від переміщення довжина пройденого шляху — величина скалярна, яка не може зменшуватися. Саме цю величину вимірює лічильник шляху, який є на кожному автомобілі. Координата ж тіла може змінюватись як завгодно.

Скалярною величиною є числове значення швидкості. Саме цю скалярну величину показують встановлені на автомобілях чи мотоциклах спідометри. Проте лічильнику, як і спідометру, «байдуже»: куди рухається автомобіль.

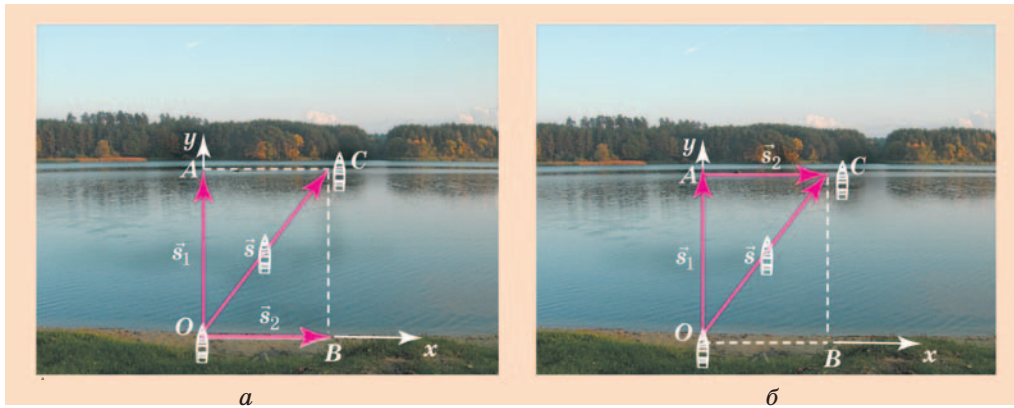
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Який рух називається рівномірним прямолінійним?
2. Що таке швидкість руху тіла? Чому швидкість руху тіла — векторна величина?
3. Які одиниці швидкості вам відомі? Які співвідношення між ними?
4. Що таке рівняння руху?

§ 7 ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Розглянемо рух тіла, наприклад човна, що перетинає річку перпендикулярно до течії (мал. 21 а, б), спостерігаючи цей рух з нерухомої системи відліку (берег річки) і з рухомої (вода у річці).

Якби вода у річці була нерухомою (озеро), то човен, рухаючись відносно неї уздовж осі Oy , через певний час опинився б у точці A , тобто відносно води він здійснив би переміщення \vec{s}_1 . Насправді вода у річці тече вздовж осі



Мал. 21

Ox і за той самий час її переміщення \vec{s}_2 , отже, вона зносить човен. Якби він не віддалявся від берега, то опинився б разом з водою у точці B .

Яким же буде результуюче переміщення човна відносно нерухомої системи відліку (берега)?

Щоб відповісти на це запитання, слід додати два вектори \vec{s}_1 і \vec{s}_2 за правилом паралелограма (мал. 21, *a*) або трикутника (мал. 21, *б*).

Згідно з правилом паралелограма сумарний вектор \vec{s} є діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах \vec{s}_1 і \vec{s}_2 як на сторонах; при цьому початки всіх трьох векторів знаходяться в одній точці:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 . \quad (1.10)$$

Це рівняння називають **правилом додавання переміщень**: переміщення тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює векторній сумі його переміщення відносно рухомої системи відліку і переміщення рухомої системи відліку відносно нерухомої.

Отже, рух човна складається з двох незалежних один від одного рухів — руху човна і руху річки. Таким чином, човен відносно берега здійснить переміщення на вектор \vec{s} і пристане до берега у точці C .

Розділимо кожний член виразу для переміщень на спільний для них час руху t :

$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t} .$$

Бачимо, що $\frac{\vec{s}}{t} = \vec{v}$ — швидкість човна відносно нерухомої системи відліку

(берега), $\frac{\vec{s}_1}{t} = \vec{v}_1$ — швидкість човна відносно рухомої системи відліку

(води), $\frac{\vec{s}_2}{t} = \vec{v}_2$ — швидкість течії відносно берега, тобто рухомої системи

відліку відносно нерухомої. Зробивши такі заміни, отримаємо **правило (закон) додавання швидкостей**:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 . \quad (1.11)$$

Отже, швидкість човна в річці складається з векторної суми швидкості човна у стоячій воді і швидкості самої течії, тобто **швидкість тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла відносно рухомої системи відліку і швидкості рухомої системи відліку відносно нерухомої.**

На цьому прикладі ми ще раз пересвідчилися у **відносності станів руху і спокою**: бачимо, що траєкторії, швидкості і переміщення тіл суттєво розрізняються залежно від того, у якій системі відліку ми їх розглядаємо. Також робимо висновок, що будь-який механічний рух може бути представлений як сума кількох незалежних рухів (складових рухів), що дає змогу аналізувати його детальніше.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як додаються переміщення тіла? Наведіть приклади.
2. Сформулюйте правило додавання швидкостей руху тіл.
3. Чи заважає течія плавцю перепливти річку? Чи заважає йому течія перепливти річку найкоротшим шляхом?
4. Як ви розумієте твердження «переміщення і швидкість — поняття відносні»?

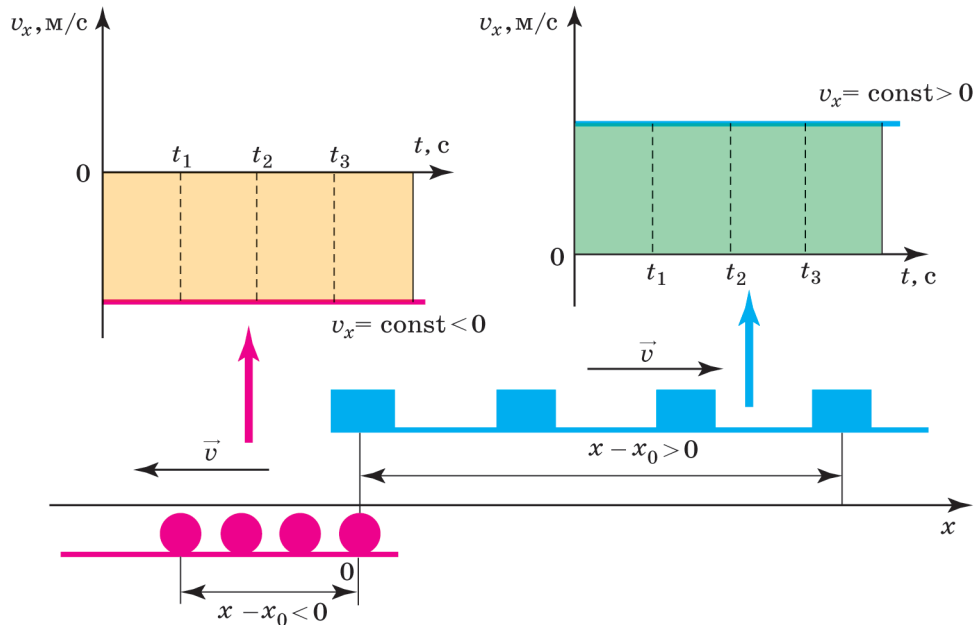
§ 8 ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РІВНОМІРНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

З курсу математики вам відоме поняття *функціональної залежності змінних величин*, ви досліджували властивості різних функцій, зокрема, вивчаючи їх графіки. Оскільки мовою фізики є математика, то графічний аналіз є одним з наочних допоміжних наукових методів дослідження: за графіками відомих фізичних величин можна визначати значення фізичних величин для певних значень параметрів, або навпаки, відкладаючи на координатних осях експериментальні значення параметра і величини, будувати і досліджувати графік їхньої функціональної залежності. На осях при цьому позначають числові значення величин, тобто графіки будують для їхніх модулів або проекцій.

Нам вже відомі функціональні залежності шляху, переміщення, координати, швидкості тіла від часу, коли тіло рухається рівномірно і прямолінійно. Графіки цих залежностей дають змогу наочно досліджувати характер руху тіл, а також розв'язувати кількісні задачі.

При вдалому виборі системи координат задачу можна спростити. Будуючи графіки для рівномірного прямолінійного руху, напрямимо вісь Ox уздовж траєкторії руху, у цьому разі рух характеризуватиметься проекціями кінематичних величин тільки на одну вісь.

Графік швидкості прямолінійного рівномірного руху тіла. Графіком швидкості руху тіла називають графік залежності проекції швидкості на вісь Ox від часу, тобто залежність $v_x = v(t)$ (мал. 22). Під час рівномірного прямолінійного руху швидкість тіла у будь-який момент дорівнює початковій, тому проекція швидкості руху тіла є сталою. Уздовж вертикальної осі відкладатимемо у певному масштабі значення проекції швидкості v_x , а вздовж горизонтальної осі — час t . Оскільки для будь-якого моменту зна-



Мал. 22

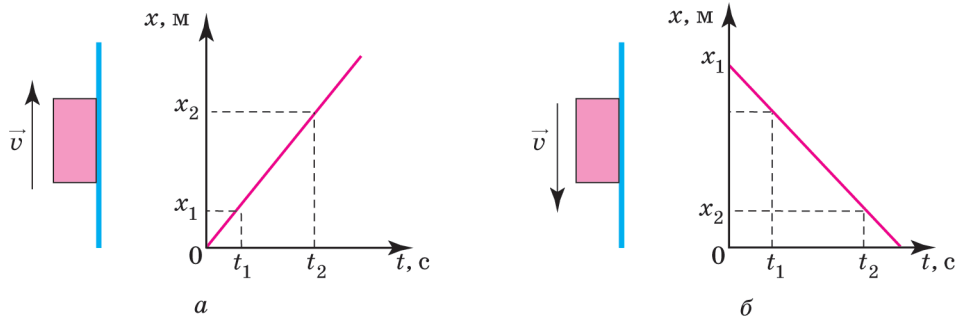
чення проекції швидкості одне й те саме, то графік складатиметься з точок, рівновіддалених від осі часу, тобто матиме вигляд прямої, яка паралельна осі часу.

Якщо тіло рухається у додатному напрямі осі Ox , тобто напрям вектора швидкості \vec{v} і осі Ox збігаються, то проекція швидкості руху буде додатною: $v_x > 0$. Графік швидкості в цьому разі зображатиметься прямою, що лежить вище від осі t (правий графік на мал. 22).

Якщо ж тіло рухається у від'ємному напрямі осі Ox , тобто напрям вектора швидкості \vec{v} і осі Ox протилежні, то проекція швидкості руху буде від'ємною: $v_x < 0$. Графік швидкості в цьому разі зображатиметься прямою, що лежить нижче від осі t (лівий графік на мал. 22).

Щоб визначити значення проекції переміщення тіла за час t , користуючись формулою $s_x = v_x t$, треба знайти добуток значень проекції v_x і часу t . За графіком швидкості це відповідатиме визначенню площі прямокутника, обмеженого лінією графіка, осями координат і перпендикуляром до осі часу у точці t . На мал. 22 прямокутники, що відповідають різним напрямкам руху, відзначені кольором, розміщені по різні боки від осі часу відповідно до знаків проекцій вектора швидкості. Звичайно, площа прямокутників матиме розмірність довжини, а не геометричної площі.

Графік координати (графік руху тіла). Якщо по горизонтальній осі (вісь абсцис) відкладати, як і раніше, у певному масштабі час, що пройшов від початку його відліку, а по вертикальній осі (вісь ординат) відкладати в певному масштабі координату тіла, то побудований графік виражатиме залежність координати тіла від часу $x = x(t)$. Такий графік називають графіком координати або графіком руху.



Мал. 23

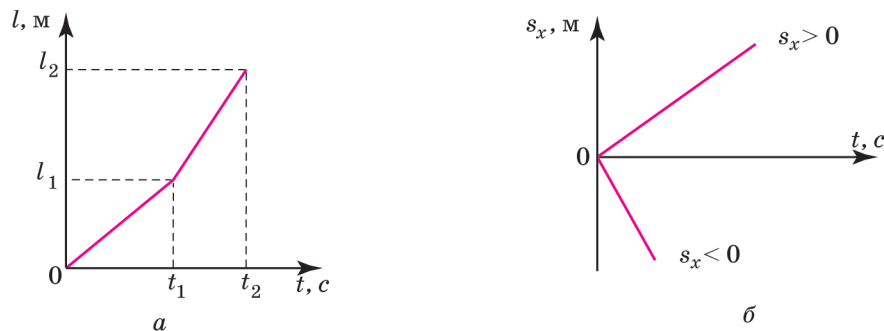
Відповідно до залежності $x = x_0 + v_x t$ графік рівномірного прямолінійного руху тіла зображатиметься прямою лінією, яка проходить через точку x_0 на осі ординат під певним кутом нахилу до осі часу.

Тангенс кута нахилу прямої дорівнює значенню проекції швидкості v_x , його визначають, поділивши $x_2 - x_1$ на $t_2 - t_1$ для двох довільно взятих точок на прямій (мал. 23): $\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v_x$.

Якщо графіком руху є горизонтальна пряма, то це означає, що тіло нерухоме, вертикальне розташування графіка відповідало б нескінченно великій швидкості, але це ідеальна межа, оскільки у природі максимальною є швидкість світла у вакуумі ($c = 300\,000$ км/с). Чим ближче напрям графіка до вертикального, тим більша швидкість руху тіла v_x . Якщо $v_x > 0$, то графік нахилений до осі часу під гострим кутом (мал. 23, а); при $v_x < 0$ кут нахилу графіка тупий (мал. 23, б).

Висновки про співвідношення швидкостей різних рухів тіл можна робити на основі графіків тільки тоді, коли обидва графіки виконано в одному й тому самому масштабі (або коли на графіках відношення одиниць часу таке саме, як відношення одиниць відстані).

Графік шляху. Графіком шляху називають залежність пройденого тілом шляху l від часу руху t : $l = l(t)$. Під час рівномірного прямолінійного руху значення шляху, пройденого тілом, прямо пропорційне часу руху. Графік шляху завжди проходить через початок координат (адже пройдений шлях не може набувати від'ємних значень). Нахил графіка залежить від значення швидкості руху тіла v : більшій швидкості відповідає більший кут нахилу (мал. 24, а).



Мал. 24

Графік проекції переміщення. Графік проекції переміщення тіла відображає залежність його проекції переміщення від часу: $s_x = s(t)$. У разі рівномірного прямолінійного руху це прямо пропорційна залежність $s_x = v_x t$, отже, її графіком буде пряма, що завжди проходить через початок координат. Якщо проекція швидкості додатна ($v_x > 0$), то графік знаходиться над віссю часу, якщо проекція швидкості від'ємна ($v_x < 0$), то графік проходить під віссю часу. Кут нахилу графіка залежить від модуля проекції швидкості: більшій швидкості відповідає більший кут нахилу, тобто чим більша швидкість, тим сильніше змінюється проекція переміщення з часом (мал. 24, б).

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Який вигляд має графік швидкості тіла при рівномірному прямолінійному русі?
2. Як будують графік координати (графік руху тіла) під час рівномірного прямолінійного руху?
3. Який вигляд має графік пройденого шляху? Від чого залежить кут нахилу прямої графіка?
4. Чим відрізняється графік шляху від графіка проекції переміщення?
5. В якому випадку графік рівномірного руху тіла виходить з початку координат?
6. Графік руху перетинає вісь часу: що це означає?

§ 9 НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ. МИТТЄВА ШВИДКІСТЬ

Рівномірний прямолінійний рух, тобто рух зі сталою швидкістю, досить рідкісне явище в навколишньому середовищі. Значно частіше доводиться мати справу з такими рухами, під час яких швидкість руху з часом змінюється за модулем і напрямом. Такі рухи називають нерівномірними.

Рух тіла, під час якого серед інтервалів часу є такі рівні інтервали, за які тіло здійснює неоднакові переміщення, називають **нерівномірним рухом**.

Нерівномірно рухаються автомобілі, літаки та інші транспортні засоби. Нерівномірно рухаються тіла, що падають; кинуті вгору та під кутом до горизонту. Тому визначати переміщення тіла під час нерівномірного руху за формулою $\vec{s} = \vec{v}t$ не можна, оскільки швидкість руху тіла у різних точках траєкторії й у різні моменти часу неоднакова, тобто швидкість руху не є сталою. *Якою швидкістю можна характеризувати нерівномірний рух тіла?*

З курсу фізики 8 класу вам відомо, що для характеристики нерівномірного руху, під час якого швидкість тіла може значно змінюватися у різних точках траєкторії, для спрощення умовно вважають рух на певній ділянці шляху **рівномірним** і користуються **середньою швидкістю проходження шляху тілом**, або **середньою шляховою швидкістю**.

Середня шляхова швидкість визначається відношенням шляху, пройденого тілом, до повного часу його руху.

$$v_{\text{сеп}} = \frac{l}{t},$$

де $v_{\text{сеп}}$ — середня шляхова швидкість руху тіла; l — весь пройдений тілом шлях; t — повний час руху тіла, включаючи і час його зупинок.

Звичайно, отримані при цьому значення середньої швидкості можуть не збігатися зі швидкістю руху тіла на окремих ділянках траєкторії. Під час нерівномірного руху тіло на одних ділянках має меншу швидкість, на інших — більшу. Наприклад, літак, що відлітає з аеропорту, починаючи зліт, збільшує свою швидкість, потім летить з певною сталою швидкістю, і перед посадкою зменшує швидкість свого руху.

Середня шляхова швидкість є скалярною величиною, вона дає змогу обчислити шлях, який подолає, наприклад, автобус за певний час, але точний результат можна отримати тільки для ділянки шляху, на якій визначалася середня швидкість, у решті випадків результат матиме оціночний характер, тому скористатися середньою швидкістю для розв'язання основної задачі механіки не можна (ще і тому, що вона ніяк не характеризує напрям руху).

Наведеній вище формулі для визначення шляхової середньої швидкості можна надати розгорнутого вигляду:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

де l_1, l_2, \dots, l_n — ділянки шляху, пройдені тілом за відповідні інтервали часу t_1, t_2, \dots, t_n .

Є клас задач, за умовами яких тіло рухається на окремих n ділянках шляху рівномірно зі швидкостями відповідно v_1, v_2, \dots, v_n . Чи можна в цьому разі виразити через них середню шляхову швидкість? Це можна зробити у таких випадках.

Якщо тіло рухалося на *різних* ділянках з відповідними швидкостями v_1, v_2, \dots, v_n протягом *однакових* інтервалів часу, тобто $t_1 = t_2 = \dots = t_n = t$, то середню шляхову швидкість можна обчислити за формулою середнього арифметичного цих швидкостей:

$$v_{\text{сеп. а}} = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}.$$

Якщо ж у задачі тіло рухалося протягом *різних* інтервалів часу з відповідними швидкостями v_1, v_2, \dots, v_n на *однакових* ділянках шляху, тобто $l_1 = l_2 = \dots = l_n = l$, то середню шляхову швидкість можна обчислити за формулою **середнього гармонічного** цих швидкостей:

$$\frac{1}{v_{\text{сеп. г}}} = \frac{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \dots + \frac{1}{v_n}}{n}, \text{ або } v_{\text{сеп. г}} = \frac{n}{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \dots + \frac{1}{v_n}}.$$

Цю формулу читають так: **обернена середня швидкість дорівнює середньому арифметичному обернених швидкостей на окремих ділянках.**

Завдання. Наведені формули неважко вивести самостійно, радимо це зробити як вправу. Для спрощення можна обмежитися випадком двох ділянок. Якщо під час розв'язання задач на визначення середньої швидкості ви не пригадете цих формул — не біда, таку задачу завжди можна розв'язати за простою вихідною формулою.

Трохи нижче нам знадобиться схарактеризувати швидкість нерівномірного руху, враховуючи її напрям. Для таких завдань у кінематиці роз-

глядають ще **середню швидкість переміщення** $\vec{v}_{\text{сеп}}$. При цьому для спрощення нерівномірний рух тіла довільною траєкторією умовно вважають **рівномірним і прямолінійним**, тобто покладають, що тіло рухається до кінцевого пункту рівномірно із середньою швидкістю найкоротшим шляхом по прямій уздовж вектора переміщення.

Середньою швидкістю переміщення під час нерівномірного руху називають векторну величину, що характеризує переміщення, яке в середньому здійснює тіло за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося.

$$\vec{v}_{\text{сеп}} = \frac{\vec{s}}{t},$$

де $\vec{v}_{\text{сеп}}$ — середня швидкість переміщення тіла; \vec{s} — результуюче переміщення тіла; t — повний час руху тіла, включаючи і час його зупинок.

Наведеній формулі можна надати розгорнутого вигляду:

$$\vec{v}_{\text{сеп}} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \dots + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

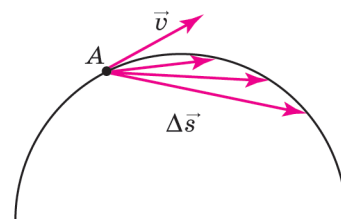
де $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_n$ — переміщення тіла за відповідні інтервали часу t_1, t_2, \dots, t_n .

Середня швидкість переміщення за визначенням — векторна величина, її напрям збігається з напрямом результуючого переміщення. Зрозуміло, що під час нерівномірного руху тіла довільною траєкторією напрям середньої швидкості переміщення у загальному випадку не збігатиметься з напрямом переміщень тіла на окремих ділянках, а її модуль — з модулями швидкостей на них. Тому середню швидкість переміщення, визначену для довільних переміщень, також не можна використати для розв'язання основної задачі механіки.

Середня швидкість характеризує рух тіла на певній ділянці траєкторії, але не дає відомостей про його рух у певній точці траєкторії (у певний момент часу). У загальному випадку швидкість може неперервно змінюватись, проте для вивчення руху часто важливо знати швидкість саме у даний момент часу (у певній точці траєкторії) — **миттєву швидкість**.

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

Для визначення миттєвої швидкості у точках довільної траєкторії скористаємося введеним вище поняттям середньої швидкості переміщення $\vec{v}_{\text{сеп}}$. З визначення рівномірного прямолінійного руху випливає, що для нього миттєва швидкість і середня швидкість переміщення збігаються і є однаковими у всіх точках траєкторії. Розглянемо нерівномірний рух точки A по криволінійній траєкторії (мал. 25), під час якого вона здійснила невелике переміщення $\Delta\vec{s}$ за інтервал часу Δt . Для цієї ділянки нерівномірного руху можна визначити вектор середньої швидкості переміщення за формулою $\vec{v}_{\text{сеп}} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$, напрям якого збігається з напрямом переміщення $\Delta\vec{s}$. Тепер будемо зменшувати переміщення $\Delta\vec{s}$,



Мал. 25



Мал. 26

якому кожного разу буде відповідати зменшений інтервал часу Δt і свій вектор середньої швидкості переміщення $\vec{v}_{\text{сеп}}$. Як видно з мал. 25, це призведе до зміни напрямку вектора середньої швидкості $\vec{v}_{\text{сеп}}$, крім того, за менший інтервал часу Δt рух тіла буде все менше змінюватися і все більше наближатися до рівномірного прямолінійного руху.

При послідовному зменшенні інтервалів переміщення і часу ($\Delta \vec{s}$ і Δt прямують до нуля) вектор середньої швидкості переміщення $\vec{v}_{\text{сеп}}$ за напрямом все більше наближатиметься до напрямку дотичної у точці A траєкторії руху, а переміщення $\Delta \vec{s}$ «стягуватиметься» до точки A , у межах якого вектор середньої швидкості буде майже сталим за напрямом і модулем. Граничні напрям і модуль вектора середньої швидкості й беруть за вектор **миттєвої швидкості**.

Миттєва швидкість, або **швидкість у даній точці** — це векторна величина, яка дорівнює відношенню достатньо малого переміщення на ділянці траєкторії, що містить у собі цю точку, до малого інтервалу часу, за який це переміщення відбулося.

Вектор миттєвої швидкості лежить на дотичній до траєкторії руху тіла у даній точці і напрямлений у бік руху тіла.

Останній висновок пригадаємо, коли вивчатимемо рівномірний рух точки по колу. Зрозуміло, що у разі прямолінійного руху вектор миттєвої швидкості завжди має напрям уздовж прямої траєкторії.

Знаючи миттєву швидкість руху тіла, можна розв'язати основну задачу механіки для нерівномірних рухів. Далі вивчатимемо деякі з них, коли такі розв'язки знайти досить просто.

На всіх сучасних транспортних засобах встановлюють спеціальні прилади — **спідометри** (мал. 26), які показують числове значення швидкості у даний момент часу.

Зрозуміло, що за спідометром не можна визначити напрям швидкості. Для деяких засобів транспорту, наприклад для морських кораблів і літаків, буває необхідно знати також напрям швидкості руху. Тоді, крім спідометра, встановлюють ще й інші навігаційні прилади, в найпростішому випадку — компас.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Навіщо вводять поняття середньої і миттєвої швидкості руху тіла? Коли застосовують кожне з них для опису руху?
2. Чим відрізняється середня швидкість переміщення від середньої швидкості проходження шляху?
3. В якому випадку середня швидкість руху тіла дорівнюватиме середньому арифметичному її значень на окремих ділянках?
4. Що таке миттєва швидкість руху тіла? Чому вона дорівнює?
5. Як напрямлена миттєва швидкість під час криволінійного і прямолінійного рухів?
6. Поясніть вираз «малий інтервал часу» у визначенні миттєвої швидкості руху тіла.

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Велосипедист рухається зі швидкістю 5 м/с. З якою швидкістю рухався пішохід, що вийшов з того самого місця на 1 год раніше, якщо велосипедист наздогнав його через 30 хв після початку свого руху?

Дано:
 $v_1 = 5 \text{ м/с}$
 $t = 1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$
 $t_1 = 30 \text{ хв} = 1800 \text{ с}$

$v - ?$

Розв'язання
 Велосипедист і пішохід подолали однакову відстань, отже, $v_1 t_1 = v(t + t_1)$.

$$\text{Звідси } v = \frac{v_1 t_1}{t + t_1}.$$

Підставимо значення відомих величин і отримаємо

$$v = \frac{5 \text{ м/с} \cdot 1800 \text{ с}}{3600 \text{ с} + 1800 \text{ с}} \approx 1,7 \text{ м/с}.$$

В і д п о в і д ь: пішохід рухався зі швидкістю 1,7 м/с.

2. Залежність від часу координати точки, яка рухається вздовж осі Ox , має вигляд: $x = 3 - 0,4t$, м. Опишіть характер руху точки. Запишіть рівняння для проекції швидкості руху точки.

В і д п о в і д ь: точка рухається рівномірно прямолінійно у протилежному напрямі осі Ox ; початкова координата точки $x_0 = 3$ м; точка рухається зі швидкістю $v = 0,4$ м/с; рівняння проекції швидкості руху точки: $v_x = -0,4t$, м/с.

Рівень А

14. Які тіла рухаються прямолінійно: а) випущений з рук камінь; б) Місяць по своїй орбіті; в) поїзд метро вздовж платформи станції?
15. У суботу до повернення в гараж автобус зробив десять рейсів, а в неділю — 12. В який із цих днів автобус проїхав більший шлях? Здійснив більше переміщення?

16. Яку форму повинна мати траєкторія точки, щоб пройдений нею шлях дорівнював модулю переміщення?
17. Які потрібно виконати вимірювання, щоб визначити швидкість руху тіла при рівномірному прямолінійному русі?
18. Автомобіль рухався 0,5 год зі швидкістю 10 м/с. Який шлях він проїхав?
19. Автобус за перші 1,5 год руху проїхав шлях 60 км, а за наступні 0,5 год — 80 км. Яка середня швидкість руху автобуса на всьому шляху?
20. Кулька скочується з похилого жолоба за 3 с. Чи є рух кульки по жолобу рівномірним? Яка середня швидкість руху кульки по жолобу довжиною 45 см?
21. Про яку швидкість руху тіла — середню чи миттєву — йде мова в таких випадках: а) швидкість руху сокири в момент удару об поліно дорівнює 10 м/с; б) поїзд пройшов шлях між станціями зі швидкістю 60 км/год; в) швидкість пішохода дорівнює 3 км/год?
22. Матеріальна точка, рухаючись у певному напрямі, пододала шлях 3 м, потім після зупинки і повороту на 90° , рухаючись по прямій, пройшла ще 4 м. Визначте весь шлях і модуль повного переміщення.
23. Поїзд довжиною 300 м іде через міст, довжина якого 200 м, зі швидкістю 72 км/год. За який час поїзд переїде через міст?
24. Першу половину часу автомобіль проїхав з середньою швидкістю 40 км/год, другу — з середньою швидкістю 60 км/год. Визначте середню швидкість руху автомобіля за весь час руху.
25. З катера, що пливе за течією, кинули рятувальний круг. Через 15 хв катер змінив напрям руху на протилежний. Коли він порівняється з кругом? Як зміниться відповідь, якщо катер спочатку рухатиметься проти течії?
26. Корабель пливе на південь зі швидкістю 42,3 км/год. Спостерігач на палубі побачив у морі катер і визначив, що відносно корабля він пливе на північний схід зі швидкістю 30 км/год. Яка швидкість руху катера відносно Землі і в якому напрямі він пливе?
27. Дві прямі дороги перетинаються під кутом 60° . Від перехрестя віддаляються два автомобілі зі швидкостями 40 км/год та 80 км/год. Визначте швидкість руху першого автомобіля відносно другого.
28. Які з наведених залежностей описують рівномірний рух: а) $x = 4t + 2$, м; б) $x = 3t^2$, м; в) $x = 8t$, м; г) $v = 4 - t$, м/с; ґ) $v = 6$, м/с?

Рівень В

29. Першу половину шляху автомобіль проїхав з середньою швидкістю 60 км/год, другу — зі швидкістю 40 км/год. Визначте середню швидкість руху автомобіля на всьому шляху.
30. Катер проплив першу половину шляху з середньою швидкістю в 2 рази більшою, ніж другу. Середня швидкість на всьому шляху становила 4 км/год. Визначте швидкості катера на першій і другій половинах шляху.
31. Катер, рухаючись за течією, подолав деяку відстань в 3 рази швидше, ніж під час руху проти течії. Середня швидкість катера на всьому

- шляху 3 км/год. Визначте швидкість течії і швидкість руху катера відносно води.
32. Велосипедист і пішохід рухаються назустріч один одному. Початкова відстань між ними дорівнює 4 км. Велосипедист рухається зі швидкістю 15 км/год, пішохід — 5 км/год. Через який час вони зустрінуться? Який шлях пройде пішохід до зустрічі? Розв'яжіть задачу в системі відліку, пов'язаній: а) із Землею; б) з пішоходом.
33. Теплохід, довжина якого 300 м, рухається в стоячій воді зі швидкістю v_1 . Катер пропливає від корми теплохода до його носа і назад за час 37,5 с зі швидкістю 90 км/год. Визначте швидкість теплохода.
34. Швидкість поздовжньої подачі різця токарного верстата 12 см/хв, поперечної — 5 см/хв. Яка його швидкість у системі відліку, пов'язаній з корпусом верстата?
35. Вагон шириною 3,6 м рухався зі швидкістю 15 м/с. Його стінки пробіла куля, що летіла перпендикулярно до напрямку руху вагона. Відносно зміщення дірок у стінках вагона 9,0 см. Визначте швидкість руху кулі.
36. Людина перепливає річку завширшки h . Під яким кутом α до напрямку течії треба пливти, щоб якнайшвидше перепливти річку? За який час t людина перепливе річку і на яку відстань l її віднесе течія? Який шлях s пропливе людина, якщо швидкість течії v_1 , а швидкість людини відносно води v ?
37. Рівняння руху автомобіля: $x_1 = -270 + 12t$, м/с, пішохода: $x_2 = -1,5t$, м/с. Побудуйте графіки руху. Визначте положення автомобіля та пішохода при $t = 0$. Коли вони зустрінуться? Який шлях пройде пішохід до зустрічі?
38. Швидкість руху тіла у будь-який момент часу задана рівнянням $v = 5 + 2t$, м/с. Чому дорівнюють початкова швидкість і прискорення тіла? Побудуйте графік швидкості руху тіла і визначте його швидкість наприкінці п'ятої секунди.

§ 10 РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ ТІЛА. ПРИСКОРЕННЯ РУХУ ТІЛА

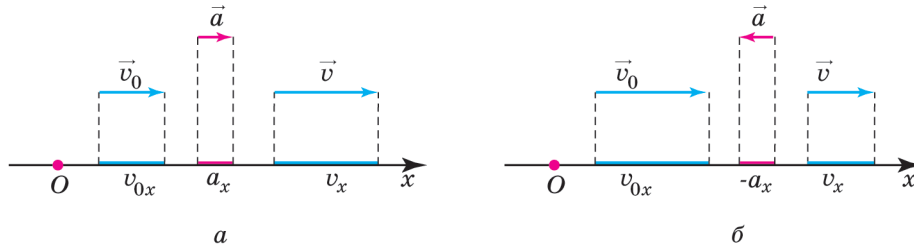
Для спрощення вивчення розглянемо такий нерівномірний рух, під час якого швидкість руху тіла за кожний однаковий інтервал часу збільшується або зменшується на певну сталу величину. Такий рух називають **рівноприскореним**.

Рух тіла, під час якого його швидкість за будь-які рівні інтервали часу змінюється однаково, називають **рівноприскореним рухом**.

У цьому визначенні зміна швидкості розглядається за будь-які рівні інтервали часу. Ця умова у даному разі так само важлива, як і при визначенні рівномірного руху, оскільки саме вона забезпечує беззаперечне виконання рівномірності зміни будь-якої фізичної величини.

Під час рівноприскореного руху швидкість може змінюватися по-різному — дуже стрімко (рух кулі в рушниці, старт ракети, розбіг літака тощо) і порівняно повільно (початок руху потяга, гальмування автомобіля тощо).

Із наведених прикладів бачимо, що, по-перше, рівноприскорені рухи трапляються у техніці і природі досить часто, а, по-друге, рівноприскорені



Мал. 27

рухи треба вміти порівнювати не тільки якісно, а й кількісно. Для цього можна, наприклад, порівнювати зміни швидкості руху різних тіл за одиницю часу.

Якщо у деякий початковий момент часу швидкість тіла дорівнювала \vec{v}_0 , а через інтервал часу t вона дорівнюватиме \vec{v} , то для визначення зміни швидкості за одиницю часу треба знайти відношення зміни швидкості $\vec{v} - \vec{v}_0$ до інтервалу часу t . Відношення $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, яке називають **прискоренням**, характеризує темп зміни швидкості рівноприскореного руху подібно до того, як вектор швидкості \vec{v} характеризує темп зміни переміщення під час рівномірного руху. Прискорення позначають малою латинською літерою \vec{a} .

Прискоренням тіла під час рівноприскореного прямолінійного руху називають векторну величину, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу і визначається відношенням зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (1.12)$$

З цієї формули видно, що вектор \vec{a} напрямлений так само, як вектор зміни швидкості $\vec{v} - \vec{v}_0$, тобто для рівноприскореного прямолінійного руху вектор прискорення паралельний прямій траєкторії. З визначення рівноприскореного прямолінійного руху випливає, що його прискорення є сталою величиною: $\vec{a} = \text{const}$.

Як випливає з формули прискорення, за одиницю прискорення слід взяти прискорення такого прямолінійного рівноприскореного руху, в якому за одиницю часу (1 с) швидкість змінюється на одиницю швидкості (1 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$). Отже в СІ одиницею прискорення буде один метр за секунду на секунду (або один метр за секунду в квадраті) — 1 $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Рівноприскорений рух може бути прискореним або сповільненим, залежно від швидкості руху тіла, яка відповідно збільшується або зменшується з часом. При визначенні значення прискорення руху треба враховувати векторні властивості цієї фізичної величини. Розглянемо прискорення та швидкість рівноприскореного руху в проекціях на вісь Ox (мал. 27, *a*, *б*), тоді формула прискорення у проекціях матиме вигляд

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \quad (1.13)$$

Якщо $v_x > v_{0x}$, тобто швидкість руху тіла збільшується (мал. 27, а), тоді модуль прискорення $a_x > 0$, а його вектор збігається з напрямом руху, то цей рух називають **рівноприскореним**.

Якщо $v_x < v_{0x}$, тоді модуль прискорення $a_x < 0$, а його вектор буде протилежним напрямку руху, то у цьому разі рух називатиметься **рівносповільненим** (мал. 27, б).

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Який рух називається рівноприскореним? Наведіть приклади.
2. Що таке прискорення руху тіла?
3. У якому випадку проекція прискорення руху тіла має додатне, а в якому від'ємне значення?

§ 11 ШВИДКІСТЬ ТІЛА І ПРОЙДЕНИЙ ШЛЯХ ПІД ЧАС РІВНОПРИСКОРЕНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

З'ясуємо, як під час рівноприскореного рівномірного руху тіла змінюється його швидкість і як визначається пройдений ним шлях.

З формули прискорення неважко визначити миттєву швидкість руху тіла у будь-який момент часу. Оскільки $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, то

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (1.14)$$

Якщо спроектувати вектори на вісь Ox , то вираз набуде вигляду

$$v_x = v_{0x} + a_{xt}. \quad (1.15)$$

Ця формула дає змогу визначити швидкість руху тіла v_x у момент часу t , якщо відомі його початкова швидкість v_{0x} і прискорення a_x . За допомогою цієї формули можна записати **закон зміни швидкості рівнозмінного прямолінійного руху**.

За цим законом ми маємо змогу вивести кінематичне рівняння шляху для рівноприскореного руху. Врахуємо, що швидкість тіла під час такого руху весь час змінюється, наприклад, на початку руху вона дорівнює \vec{v}_0 , а наприкінці руху вона вже буде \vec{v} . Тому в формулі для переміщення треба скористатися поняттям середньої швидкості переміщення:

$$\vec{s} = \vec{v}_{\text{сеп}} t = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{2} t.$$

Підставивши у цю формулу рівняння миттєвої швидкості і зробивши певні перетворення, одержимо

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad (1.16)$$

або в проекціях на вісь Ox :

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.17)$$

В окремих випадках, коли $\vec{v}_0 = 0$, рівняння переміщення набуває спрощеного вигляду $\vec{s} = \frac{\vec{a}t^2}{2}$ або в проекціях на вісь Ox : $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$.

Користуючись цими формулами, слід пам'ятати, що v_{0x} і a_x — проекції векторів \vec{v}_0 і \vec{a}_0 на вісь Ox , напрямлену вздовж прямолінійної траєкторії руху тіла, а тому вони можуть бути як додатними, так і від'ємними.

Якщо врахувати, що $\vec{s} = x = x_0$, то рівняння руху тіла при рівноприскореному прямолінійному русі матиме такий вигляд:

$$x = x_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}. \quad (1.18)$$

Під час розв'язання задач, коли потрібно визначити пройдений тілом шлях під час рівноприскореного руху і невідомо, скільки часу минуло від початку руху тіла, а відомі прискорення, початкова швидкість і миттєва швидкість руху тіла наприкінці переміщення, користуються формулою

$$l = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (1.19)$$

Це рівняння характеризує зв'язок між шляхом, пройденим тілом, і швидкістю його руху.

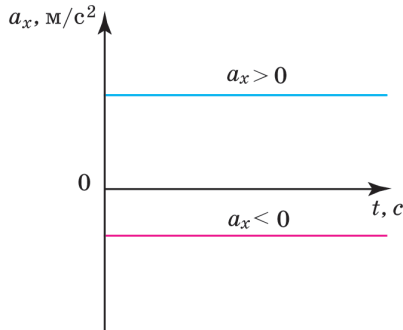
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Швидкість руху тіла — векторна величина, тому може змінюватися як модуль швидкості, так і напрям швидкості. Що саме змінюється під час рівноприскореного руху?
2. Чи може швидкість руху тіла дорівнювати нулю, а прискорення ні?
3. Що таке кінематичне рівняння рівноприскореного руху? Чим воно відрізняється від рівняння переміщення?
4. Чи можна визначити прискорення, не знаючи часу руху?
5. Чим відрізняються залежності переміщення від часу під час рівномірного і рівноприскореного руху?

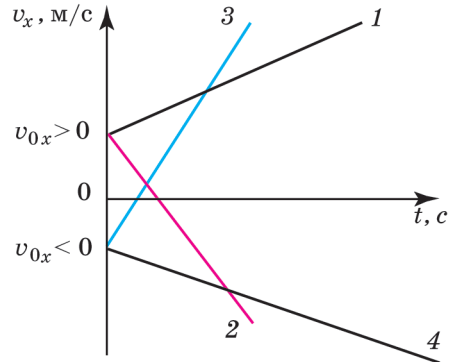
§ 12 ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

Ви вже знаєте, як графічно зображається рівномірний прямолінійний рух тіла. Спробуємо подібно до нього графічно подати рівноприскорений прямолінійний рух.

Почнемо з розгляду **графіка проекції прискорення руху тіла** $a_x = a_x(t)$. Якщо порівняти графік проекції швидкості тіла у рівномірному пря-



Мал. 28



Мал. 29

молінійному русі, де $\vec{v} = \text{const}$, з випадком, коли $\vec{a} = \text{const}$, то стає очевидним, що ці графіки ідентичні. Тому залежність проекції прискорення руху тіла від часу також являє собою пряму, паралельну з віссю часу t . Залежно від значення проекції прискорення — додатне воно чи від’ємне — це пряма, що розташована відповідно або над віссю, або під нею (мал. 28).

Графік проекції швидкості руху тіла: $v_x = v(t)$. З кінематичного рівняння $v_x = v_{0x} + a_x t$ видно, що залежність проекції швидкості руху тіла від часу є лінійною, як і в рівнянні рівномірного прямолінійного руху. Тоді нам залишається тільки проаналізувати його для нашого випадку. Залежно від значень проекцій прискорення і початкової швидкості руху тіла v_{0x} і a_x графік матиме такий вигляд (мал. 29):

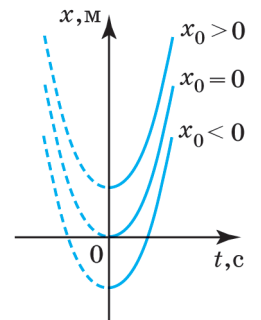
- 1 при $v_{0x} > 0, a_x > 0$;
- 2 при $v_{0x} > 0, a_x < 0$;
- 3 при $v_{0x} < 0, a_x > 0$;
- 4 при $v_{0x} < 0, a_x < 0$.

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

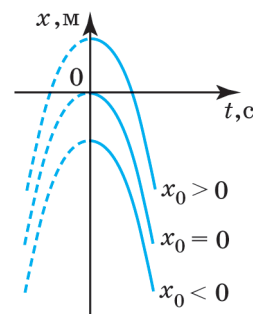
Графік руху тіла $x = x(t)$. Кінематичне рівняння руху є квадратним рівнянням вигляду $y = a + bx + cx^2$:

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

Тому графік залежності координати тіла від часу є парабола, гілки якої згідно з параметрами руху мають різний вигляд. Наприклад, якщо $v_{0x} = 0$ і $a_x > 0$, то графік має вигляд, зображений на

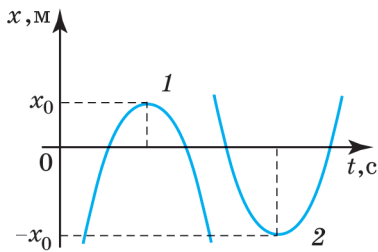


а



б

Мал. 30



Мал. 31

мал. 30, а. Якщо $x_0 \neq 0$, то вершина параболи зміщується вздовж осі ординат вгору або вниз, залежно від значення x_0 .

Якщо $v_{0x} = 0$ і $a_x < 0$, то гілки параболи зорієнтовані вниз (мал. 30, б) і зміщення вершини параболи вгору або вниз уздовж осі ординат так само залежить від значення x_0 .

Якщо $v_{0x} \neq 0$ і $x_0 \neq 0$ (мал. 31), то вершина параболи зміщується в точку, координати якої визначаються співвідношеннями:

$x = x_0 - \frac{v_{0x}^2}{2a_x}$; $t = -\frac{v_{0x}}{a_x}$: 1 — для $v_{0x} > 0, a_x < 0$; 2 — для $v_{0x} < 0, a_x > 0$.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Який вид має графік прискорення руху тіла?
2. Чим відрізняється графік швидкості рівномірного прямолінійного руху від графіка швидкості рівноприскореного руху?
3. Як за графіком проекції швидкості рівноприскореного руху визначають проекцію переміщення тіла?
4. Від чого залежить напрям і розташування гілок параболи на графіках рівноприскореного руху тіла?

ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Фізика — наука експериментальна. Це означає, що основою всіх результатів, одержаних наукою, є дослід. Будь-яка теорія, розроблена вченими, повинна бути підтверджена експериментально.

Виконуючи лабораторні роботи, роботи фізичного практикуму, ви виконуєте найпростіші досліди, аналізуєте результати, робите висновки.

Під час того чи іншого вимірювання ви повинні знати ступінь достовірності одержаного результату, оскільки всі вимірювання проводяться з певною точністю, то їх результат завжди наближений.

Окремі вимірювання ви проводите безпосередньо, тобто визначаєте шукані величини за допомогою вимірювальних приладів. Такі вимірювання називаються прямими. До них належать вимірювання лінійних розмірів, сили, маси, часу, сили струму, напруги тощо.

Різниця між дійсним значенням вимірюваної величини a і одержаним вами результатом a_d називається **абсолютною похибкою** Δa і дорівнює $a = |a - a_d|$.

Похибка вимірювань в основному визначається точністю вимірювального приладу (інструментальна похибка), яка, як правило, вказується на вимірювальних приладах, та похибкою відліку.

Межа похибки відліку становить половину ціни поділки шкали приладу. Наприклад, при вимірюванні лінійкою з міліметровими поділками ви одержите точніший результат, ніж лінійкою, ціна поділки якої 1 см. Якщо

вимірювані розміри більші за довжину лінійки, вам доведеться проводити вимірювання, прикладаючи лінійку двічі або тричі. При цьому точність результату зменшується.

Значною мірою точність результатів залежить від акуратності проведених вами вимірювань. Однак за будь-яких умов не вдається уникнути певних похибок, пов'язаних з умовами вимірювання фізичних величин. Наприклад, через затримку в часі реакції людини, яка вмикає і вимикає секундомір, у вимірювання часу можуть бути внесені суттєві похибки, які значно перевищують інструментальні. Найпростішим шляхом зменшення таких похибок є проведення кількох (за незмінних умов досліду) вимірювань тієї самої величини і обчислення її середнього арифметичного значення.

Реєструючи покази, треба дивитись перпендикулярно до шкали, користуватися приладами з точною та чіткою шкалою, правильно визначати ціну поділки шкали тощо.

Результат безпосередніх (прямих) вимірювань величини a записується так:

$$a = a_d \pm \Delta a.$$

Слід пам'ятати, що чим більше a_d відрізняється від Δa , тим точніший результат.

Наприклад, лінійкою з ціною поділки 1 см вимірюють довжину і ширину стола (мал. 32). В обох випадках абсолютна похибка дорівнює 0,5 см, але довжина стола більша і тому похибка становить меншу частину довжини, ніж ширини.

Чим менше значення шуканої величини, тим з меншою ціною поділки (точнішим) повинен бути інструмент для її вимірювання.

Як бачимо, абсолютної похибки недостатньо для оцінки точності результатів вимірювань, її можна оцінити на основі відносної похибки.

Відносною похибкою вимірювань ε називається відношення абсолютної похибки до значення вимірюваної величини:

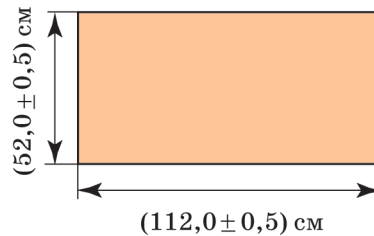
$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100\%.$$

При виконанні лабораторних робіт можна вважати задовільними результати, коли відносна похибка не перевищує 4—6%.

Якщо відносна похибка більша за 10%, то не можемо говорити про достовірність вимірювання, тому що встановлена нами залежність носить лише якісний характер.

Якщо дана фізична величина визначається через інші величини за допомогою формул, то її вимірювання є опосередкованим, непрямим.

Наприклад, для визначення площі необхідно довжину помножити на ширину $S = ab$. Визначити похибку вимірювань в цих випадках вам допоможе таблиця.



Мал. 32

Номер досліджу	Математична операція	Абсолютна похибка	ε
1	$a + b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
2	$a - b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$
3	ab	$a\Delta a + b\Delta b$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
4	$\frac{a}{b}$	$\frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
5	a^n	$\varepsilon a_{\text{сер}} = \frac{\varepsilon a}{n}$	$n \frac{\Delta a}{a}$
6	$\sqrt[n]{a}$	$\varepsilon a_{\text{сер}} = \frac{\varepsilon a}{n}$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta a}{a}$

В наведеному прикладі відносна похибка $\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$.

Декілька порад.

1. Якщо прямі вимірювання проведені з точністю до десятих часток, то опосередковані — визначаються до сотих і округлюються до десятих.

2. При визначенні величини ви можете отримати кілька результатів, причому спостерігається певна закономірність (наприклад, одержані значення зростають). При цьому застерігайтесь неправильних висновків, оскільки умови досліджу змінюються. Якщо ви визначаєте жорсткість пружини і одержали результати 42, 45, 48 Н/м, то це ще не означає, що із збільшенням сили, яка прикладена до пружини, її жорсткість збільшується. Чим більша сила (у межах пружності пружини), тим точніший результат, і відносна похибка повинна бути меншою.

3. Виконавши лабораторну роботу, проаналізуємо її результати. Робимо висновки і записуємо остаточний результат:

$$a = a_{\text{д}} \pm \Delta a, \varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100\%.$$

Важливо проаналізувати причини похибок, зокрема, де вони були найбільшими, чому і як це вплинуло на результат вашої роботи.

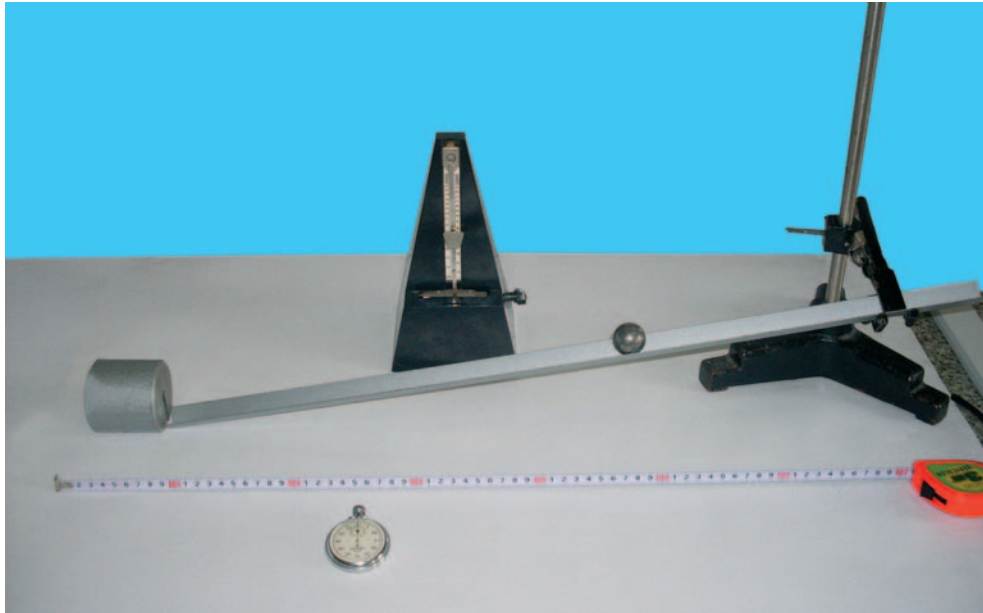
Лабораторна робота №1

Вимірювання прискорення тіла при рівноприскореному русі

Мета роботи: виміряти прискорення, з яким кулька скочується похилим жолобом.

Поради до виконання роботи

Для того щоб з'ясувати, з яким прискоренням рухається кулька похилим жолобом, потрібно виміряти шлях l , який вона проходить за час t .



Мал. 33

Оскільки при рівноприскореному русі без початкової швидкості $l = \frac{at^2}{2}$, то, вимірявши l і t , визначимо прискорення кульки: $a = \frac{2l}{t^2}$

Ніякі вимірювання не робляться абсолютно точно. Вони завжди проводяться з деякою похибкою, пов'язаною з недосконалістю засобів вимірювання та іншими причинами. Проте і за наявності похибок є кілька способів проведення достовірних вимірювань. Найпростіший з них — обчислення середньоарифметичного з результатів декількох незалежних вимірювань однієї і тієї ж величини, якщо умови досліду не змінюються. Це і пропонується зробити.

Прилади і матеріали: жолоб, штатив з муфтами і лапкою, кулька, металевий циліндр (гиря), електронний або механічний секундомір (або метроном), рулетка або вимірювальна стрічка.

Хід роботи

1. Закріпіть жолоб у штативі в похилому положенні під невеликим кутом до горизонту (мал. 33). Біля нижнього кінця жолоба покладіть металевий циліндр або гиру.

2. Пустивши кульку з верхнього кінця жолоба, ввімкніть секундомір (одночасно з ударом метронома) і зафіксуйте час (полічіть число ударів метронома) до зіткнення кульки з циліндром. (Досліди зручно проводити при 120 ударах метронома за хвилину (60 с). Результати вимірювань занесіть у таблицю.

3. За допомогою рулетки або вимірювальної стрічки визначте шлях, який пройшла кулька. Не змінюючи нахилу жолоба (умови досліду повинні залишатися незмінними), повторіть дослід 5 разів. Результати вимірювань занесіть у таблицю.

4. Змінюючи кут нахилу жолоба до горизонту, повторіть попередній дослід, занотувавши отримані результати в таблиці.

5. За формулою $l_{\text{сер}} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5}$ визначте середнє значення шляху, а за формулою $t_{\text{сер}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$ — середнє значення часу, потім розрахуйте середнє значення прискорення: $a_{\text{сер}} = \frac{2l_{\text{сер}}}{t_{\text{сер}}^2}$. Результати обчислень занесіть у таблицю.

Номер досліджу	l , м	$l_{\text{сер}}$, м	t , с	$t_{\text{сер}}$, с	$a_{\text{сер}}$, м/с ²	Δl , м	Δt , с	ε , %	Δa , м/с ²

6. За формулою $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\text{сер}}} = \frac{2l}{l_{\text{сер}}} + \frac{2t}{t_{\text{сер}}}$ визначте абсолютну і відносну похибки вимірювання. Результати роботи запишіть у такому вигляді: $a = a_{\text{сер}} \pm \Delta a$.

Для допитливих

Виконуючи дану лабораторну роботу при незмінному куті нахилу жолоба, два учні отримали такі результати: перший учень: $l_1 = 10$ см, $t_1 = 1$ с; $l_2 = 30$ см, $t_2 = 3$ с; другий учень: $l_1 = 15$ см, $t_1 = 0,5$ с; $l_2 = 60$ см, $t_2 = 1$ с. Який з учнів отримав достовірні результати?

§ 13 ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ ТІЛ. ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

Цікавими прикладами прямолінійного рівноприскореного руху, що спостерігається у природі, є рух тіла, кинутого вертикально вгору. Як свідчить досвід, це тіло з часом все ж таки впаде на Землю. Проаналізувавши його складний рух, можна зробити висновок, що на першому етапі тіло рухається вгору з від'ємним прискоренням (кожне наступне значення швидкості менше за попереднє), потім на мить зупиняється, змінює напрям свого руху і починає рухатись рівноприскорено вниз. Цей останній етап руху тіла, кинутого вертикально вгору, називають **вільним падінням**.

Якщо сталеву кулю, футбольний м'яч, розгорнуту газету, пташину пір'їну одночасно скинути з висоти кількох метрів, то, спостерігаючи за їхнім рухом, побачимо, що прискорення цих тіл різні. Це пояснюється тим, що на шляху до Землі тілам доводиться проходити крізь шар повітря, яке заважає їхньому руху. І якби можна було усунути вплив повітря, то прискорення всіх тіл були б однакові. У цьому можна переконатися на досліді з товстостінною скляною трубкою довжиною близько 1 м, один кінець якої запааяний, а на другому є кран (уперше цей дослід виконав І.Ньютон, тому така трубка називається трубкою Ньютона) (мал. 34).

Помістимо у трубку три різних предмети, наприклад свинцеву шротинку, корковий кубик і пташину пір'їну. Потім швидко перевернемо трубку. Усі три тіла впадуть на її дно, але в різний час: спочатку шротинка, потім

корковий кубик і, нарешті пір'їна (мал. 34, а). Так падають тіла тоді, коли у трубці є повітря. Якщо ж повітря з трубки відкачати насосом (мал. 34, б), потім закрити кран і знову перевернути трубку (мал. 34, в), то побачимо, що всі три тіла впадуть одночасно. Це свідчить про те, що у вакуумі всі тіла падають з однаковим прискоренням. Таке падіння у вакуумі називають **вільним падінням**.

Вільне падіння тіла — це рух тіла лише під дією земного притягання, коли інші сторонні впливи на нього відсутні.

Видатний італійський фізик Г. Галілей, вивчаючи рух тіл похилим жолобом, встановив, що кулі однакового діаметра, виготовлені з дерева, заліза, слонової кістки тощо, мають однакове прискорення, тобто воно не залежить від маси куль. Збільшуючи кут нахилу, він дійшов висновку, що значення прискорення при цьому збільшується, але залишається однаковим для всіх тіл, незалежно від їхньої маси. Далі він зазначив: якщо збільшувати кут нахилу жолоба до 90° (до вертикального його положення), то прискорення тіл не зміниться, оскільки не з'являться додаткові чинники, що впливали б на характер руху тіл. Для підтвердження цього він провів свій відомий дослід з гарматним ядром і мушкетною кулею, кидаючи їх з Пізанської вежі (мал. 35). Так Галілей експериментально встановив, що **прискорення вільного падіння не залежить від маси тіл і є сталою величиною**.

Під час численних вимірювань прискорення вільного падіння було встановлено його середнє значення: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Воно залежить від географічної широти місцевості. Так, на екваторі $g = 9,78 \text{ м/с}^2$, на полюсах $g = 9,83 \text{ м/с}^2$. Ця різниця значень зумовлена обертанням Землі навколо своєї осі.

Вільне падіння тіла з висоти h , враховуючи, що $g = \text{const}$, є аналогічним рівноприскореному руху вздовж осі Oy , додатний напрям якої збігається з напрямом вектора g . Тоді рівняння руху матиме вигляд

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}. \quad (1.20)$$

Очевидно, якщо тіло кинути вертикально вгору, то воно рухатиметься з початковою швидкістю v_0 , напрямленою вгору, і з прискоренням g , напрямленим униз. У системі відліку, пов'язаній з поверхнею Землі (якщо вісь координат напрямлена вертикально вгору), отримаємо



Мал. 34



Мал. 35

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.21)$$

Під час розв'язання задач використовують такі формули:

$$h = h_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2} \text{ і } h = h_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.22)$$



Це цікаво знати

За часів Арістотеля вважалося, що важчі тіла падають швидше за легші. Якщо одне тіло, наприклад, у сто разів важче за інше, то, згідно з Арістотелем, воно і падати повинно у сто разів швидше (і якщо вони одночасно почнуть падати з висоти ста ліктів, то до моменту, коли важче тіло долетить до Землі, легше тіло пролетить лише відстань в один лікоть, відставши від важчого на 99 ліктів). Чому він так вважав, невідомо. Ніяких спеціальних дослідів Арістотель не проводив. За словами О. Лоджа, «він, можливо, уявив собі камінь і пір'їну і задовольнився». Задовольнилися цим і всі інші. Погляди Арістотеля здавалися людям настільки природними і очевидними, що впродовж подальших вісімнадцяти сторіч майже ніхто не ставив їх під сумнів.

Проте у 1553 р. італійський учений Джованні Бенедетті опублікував статтю, в якій стверджував, що, всупереч Арістотелю, два тіла однакової форми і однакової густини, але різної ваги, перебуваючи в одному і тому ж середовищі, проходять рівні відстані за рівний час. Ця заява вимагала дослідного підтвердження. Тому, з кінця XVI ст. то в одному, то в іншому місці вчені починають проводити дослід, скидаючи важкі предмети з високих башт. Згідно з легендою вперше це зробив Галілей. «Одним чудовим ранком, — пише О. Лодж, — у присутності всього університету він піднявся на відому падаючу башту, взявши з собою два ядра: стофунтове і однофунтове. Він встановив їх на краю башти і одночасно відпустив обидва. Вони полетіли разом і разом же досягли Землі. Глухий удар об Землю падаючих ядер прозвучав як похоронний дзвін над старою системою фізики і сповістив про зародження нової».

Коли один із прихильників теорії Арістотеля дорікнув Галілею у тому, що, кажучи про одночасне падіння важкої і легкої куль, той спотворює істину, вчений відповів: «Виконавши дослід, ви знайдете, що більший випередить менший на два пальці, так що коли більший впаде на землю, то менший буде від неї на відстані товщини двох пальців. Цими двома пальцями ви хочете закрити дев'яносто дев'ять ліктів Арістотеля і, кажучи про мою невелику помилку, замовчуєте про величезну помилку іншого... Причина неоднакової швидкості падіння тіл різної ваги криється у зовнішній причині — головним чином в опорі середовища, отже, якщо усунути опір, то всі тіла будуть падати з однаковою швидкістю».

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які дослідів проводив Галілей? Що вони підтверджують?
2. Що називають вільним падінням?
3. Від чого залежить прискорення вільного падіння?
4. На якому поверсі висотної будівлі — першому або останньому — тіла падають з більшим прискоренням?
5. Де прискорення вільного падіння більше — на полюсі чи екваторі? Чому?

Задачі та вправи**Алгоритм розв'язання задач з кінематики**

Для кожного фізичного закону існує метод (алгоритм) його застосування. Алгоритм застосування фізичного закону допомагає набагато спростити роботу під час розв'язання задач.

Пропонуємо вам **алгоритм застосування законів кінематики** під час розв'язання фізичних задач, який містить у собі таку послідовність дій:

1. Визначте характер руху (поступальний, обертальний), вид руху (рівномірний, рівноприскорений, нерівномірний) і форму траєкторії (прямолінійна, криволінійна).
2. Зробіть короткий запис умови задачі, виконайте схематичний малюнок і вкажіть на ньому всі кінематичні характеристики руху тіла.
3. Виберіть тіло відліку і зв'яжіть з ним систему координат.
4. Запишіть закони кінематики у векторній формі.
5. Запишіть закони кінематики в проекціях на вибрані напрями координатних осей.
6. При необхідності доповніть систему формулами з кінематики, співвідношеннями між лінійними і кутовими характеристиками руху.
7. Розв'яжіть отриману систему рівнянь щодо шуканих величин у загальному виді.
8. Перевірте правильність розв'язку.

Розглянемо приклад виконання вказаних дій на всіх етапах розв'язання задачі.

Поїзд рухається зі швидкістю $v = 36$ км/год. Після включення гальмівного пристрою поїзд зупиняється через час $t = 0,25$ хв. Визначте прискорення поїзда і шлях, пройдений ним за час гальмування.

Аналіз умови задачі. Процес, описаний в умові задачі, — механічний рух. Поступальним називають рух, під час якого будь-яка пряма, що сполучає дві будь-які точки цього тіла, переміщається, залишаючись паралельною своєму вихідному положенню. Вважатимемо, що траєкторією руху є пряма лінія, тобто рух прямолінійний. При прямолінійному русі модуль переміщення дорівнює шляху.

Фізична система складається з одного об'єкта — поїзда, який рухається поступально. При поступальному русі всі точки поїзда рухаються однаково і тому можна розглядати рух тільки однієї його точки відносно Землі.

Прискорення характеризує темп зміни швидкості з часом. Згідно з умовою швидкість руху поїзда зменшується, це означає, що рух сповільнюється. Як результат розв'язання визначаємо значення прискорення, отже, вважаємо, що рух поїзда рівносповільнений ($\vec{a} = \text{const}$).

Наприкінці гальмування поїзд зупиняється, це означає, що його кінцева швидкість дорівнює нулю. Початкову швидкість руху перед гальмуванням поїзда дано в умові задачі.

Зробимо короткий запис умови задачі і виконаємо малюнок.

Дано:

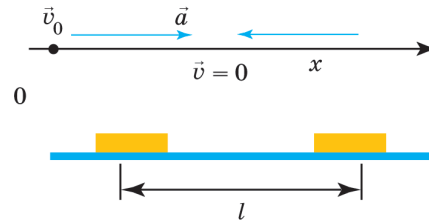
$$v_0 = 36 \text{ км/год} = 10 \text{ м/с}$$

$$t = 0,25 \text{ хв} = 15 \text{ с}$$

$$v = 0$$

$$a - ? \quad l - ?$$

Розв'язання
Виконаємо малюнок.



Складання плану розв'язання. Рівноприскорений прямолінійний рух описується рівняннями: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ і $\vec{s} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$.

Для розв'язання задачі додаткові формули не потрібні.

Враховуючи, що в цих формулах виражені зв'язки між шуканими і заданими величинами, задачу можна розв'язати методом застосування формул.

$$v_{x2} = 40 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = -10 \text{ м/с};$$

$$s_{x2} = ((40 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с})/2) \cdot 5 \text{ с} = 75 \text{ м}.$$

У момент $t_1 = 5 \text{ с}$ тіло перебуває на висоті 75 м і має швидкість 10 м/с , яка напрямлена вниз. Отже, у момент $t_1 = 5 \text{ с}$ тіло рухається вже після повороту. Пройдений тілом шлях визначимо як суму двох шляхів (рух тіла вгору і вниз) за формулою $l = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{v_{x2}^2}{2g}$. $l = 1600 \text{ м}^2/\text{с}^2 / 20 \text{ м/с}^2 + 100 \text{ м}^2/\text{с}^2 / 20 \text{ м/с}^2 = 85 \text{ м}$.

В і д п о в і д ь: $v_{x1} = 20 \text{ м/с}$; $v_{x2} = -10 \text{ м/с}$; $l = 85 \text{ м}$; $s_{x2} = 75 \text{ м}$.

Розв'язуємо разом

1. Прискорення тіла дорівнює -5 м/с^2 . Як це розуміти? Поясніть.

В і д п о в і д ь: тіло рухається рівносповільнено прямолінійно. На це вказує знак «мінус» біля значення прискорення.

2. Тіло кинули вертикально вгору зі швидкістю 40 м/с . Яка буде швидкість руху тіла через 2 с , через 5 с ? Визначте шлях, пройдений тілом, і переміщення тіла. Прискорення вільного падіння дорівнює 10 м/с^2 .

Дано:

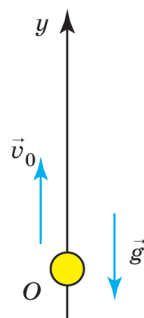
$$v_0 = 40 \text{ м/с}$$

$$t_1 = 2 \text{ с}$$

$$t_2 = 5 \text{ с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$v_{y1} - ? \quad v_{y2} - ?$$



Розв'язання
Використовуємо дві формули:

$$\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{g}t, \quad \vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2}t.$$

Знаходимо проекції величин на вісь Oy (вісь Oy напрямлена вгору):

$$v_x = v_{0y} - gt, \quad s_x = \frac{v_{0y} + v_{y1}}{2}t.$$

$s_{y1} - ? \quad s_{y2} - ? \quad l - ?$ Для моменту $t_1 = 2 \text{ с}$ за цими формулами запишемо

$$v_{y1} = 40 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ с} = 20 \text{ м/с}; \quad s_{y1} = ((40 \text{ м/с} + 20 \text{ м/с})/2) \cdot 2 \text{ с} = 60 \text{ м}.$$

Отже, в момент $t_1 = 2$ с тіло перебуває на висоті 60 м і має швидкість 20 м/с, яка напрямлена вгору. Оскільки напрям руху не змінювався, то шлях, що пройшло тіло, дорівнює 60 м.

Для моменту $t_2 = 5$ с за такими самими формулами отримаємо:

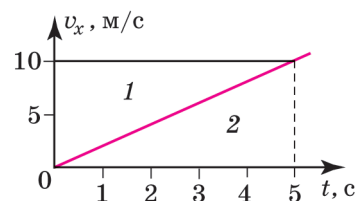
$$v_{y2} = 40 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = -10 \text{ м/с}; s_{y2} = ((40 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с})/2) \cdot 5 \text{ с} = 75 \text{ м}.$$

У момент $t_2 = 5$ с тіло перебуває на висоті 75 м і має швидкість 10 м/с, що напрямлена вниз. Отже, в момент $t_2 = 5$ с тіло рухається вже після повороту. Пройдений тілом шлях визначимо як суму двох шляхів (рух тіла вгору і вниз) за формулою $l = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{v_{y2}^2}{2g}$. $l = 1600 \text{ м}^2/\text{с}^2/20 \text{ м/с}^2 + 100 \text{ м}^2/\text{с}^2/20 \text{ м/с}^2 = 85 \text{ м}$.

В і д п о в і д ь: $v_{y1} = 20 \text{ м/с}; v_{y2} = -10 \text{ м/с}; l = 85 \text{ м}; s = 75 \text{ м}$.

Рівень А

39. Що потрібно знати для визначення положення тіла у будь-який момент часу, якщо воно рухається рівноприскорено?
40. Прискорення тіла дорівнює 2 м/с^2 . На скільки зміниться швидкість руху цього тіла за 1 с?
41. Початкова і кінцева швидкості руху тіла відповідно дорівнюють 5 м/с і 10 м/с. Як рухається це тіло?
42. Початкова і кінцева швидкості руху тіла відповідно дорівнюють 15 м/с і 10 м/с. Як рухається це тіло?
43. Прискорення тіла дорівнює 3 м/с^2 . Що це означає? Поясніть.
44. Рухаючись зі швидкістю 72 км/год, автомобіль загальмував за 5 с. Визначте гальмівний шлях.
45. Автобус рухається зі швидкістю 54 км/год. На якій відстані від зупинки водій повинен почати гальмувати, якщо для зручності пасажирів прискорення не повинне перевищувати $1,2 \text{ м/с}^2$?
46. Гальма вантажного автомобіля вважаються справними, якщо при гальмуванні автомобіля, що рухається зі швидкістю 36 км/год по сухій і рівній дорозі, гальмівний шлях не перевищує 12,5 м. Визначте відповідне цій нормі гальмівне прискорення.
47. Які з наведених залежностей описують рівноприскорений рух?
- а) $x = 3 + 2t$, м; б) $x = 4 + 2t$, м; в) $v = 6$, м/с;
г) $x = 8 - 2t - 4t^2$, м; д) $x = 10 + 5t^2$, м?
48. Залежність від часу координати точки, яка рухається вздовж осі Ox , має вигляд: $x = 2 - 10t + 3t^2$, м. Опишіть характер руху. Які початкова швидкість і прискорення руху тіла? Запишіть рівняння для проекції швидкості руху тіла.
49. Швидкість руху матеріальної точки в будь-який момент часу задана рівнянням $v = 3 + t$, м/с. Чому дорівнює початкова швидкість і прискорення тіла?

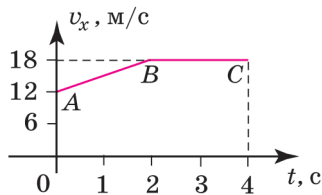


Мал. 36

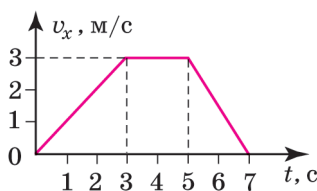
50. На мал. 36 зображені графіки проекцій швидкостей руху двох тіл: 1, 2. Визначте: а) вид руху тіл; б) прискорення руху тіл; в) через скільки секунд після початку руху швидкості тіл будуть однаковими. Запишіть залежність координат тіл від часу.
51. За який час камінь, який почав своє падіння без початкової швидкості, подолає шлях 80 м?
52. На яку максимальну висоту підніметься тіло, кинуте вертикально вгору зі швидкістю 8 м/с?
53. Спортсмен стрибнув з десятиметрової вишки у воду. Визначте швидкість занурення спортсмена у воду і час перебування в польоті. Опором повітря знехтувати.
54. Гелікоптер почав підніматися із Землі вертикально вгору з прискоренням $0,2 \text{ м/с}^2$. Через 10 с з нього скинули вантаж. Через який час від початку падіння вантаж досягне Землі?

Рівень В

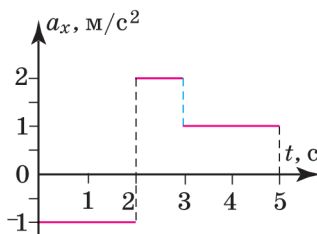
55. Кулька котиться по жолобу без початкової швидкості і за першу секунду проходить 10 см. Який шлях вона пройде за час 3 с? Який шлях вона пройде за третю секунду?
56. За яку секунду від початку рівноприскореного руху тіло пройде шлях, втричі більший за шлях, пройдений за попередню секунду?
57. Через 10 с після початку руху швидкість поїзда дорівнює 0,6 м/с. Через який час після початку руху швидкість поїзда дорівнюватиме 3 м/с?



Мал. 37



Мал. 38



Мал. 39

58. Автомобіль почав рухатись з прискоренням $1,5 \text{ м/с}^2$ і за деякий час проїхав відстань 12 м. Визначте його швидкість руху в цей момент і середню швидкість.
59. Схил довжиною 100 м лижник проїхав за 20 с, рухаючись із прискоренням $0,3 \text{ м/с}^2$. Яка швидкість лижника на початку і наприкінці схилу?
60. Тіло кинули вертикально вгору з початковою швидкістю 19,6 м/с. Визначте координату і швидкість руху тіла через 3 с, а також шлях, що пройшло тіло за цей час.
61. Визначте вид руху, відповідний ділянкам графіка *AB* і *BC* (мал. 37). Чому дорівнює прискорення тіла на кожній з ділянок? Який модуль швидкості тіла на початку і наприкінці руху?
62. На мал. 38 зображено графік залежності проекції швидкості прямолінійного руху тіла від часу. З яким прискоренням рухалось тіло в інтервалах часу: 1—3 с; 3—5 с; 5—7 с? Накресліть графік залежності проекції прискорення від часу руху.

63. Залежності від часу координат двох точок, які рухаються вздовж осі Ox , мають вигляд: $x_1 = 15 + t^2$, м і $x_2 = 8t$, м. Опишіть характер руху кожного тіла. Побудуйте графіки руху. Визначте час і місце зустрічі тіл.
64. За графіком проекції прискорення руху тіла (мал. 39) побудуйте графіки для проекції швидкості і для проекції переміщення, якщо початкова швидкість руху тіла дорівнює 2 м/с .
65. Тіло рухається вздовж прямої спочатку протягом 5 с рівномірно зі швидкістю 5 м/с , потім рівноприскорено протягом 10 с з прискоренням 1 м/с^2 , напрямленим протилежно початковій швидкості. Побудуйте графіки залежності швидкості, координати і пройденого тілом шляху від часу. Початкова координата дорівнює нулю, напрям осі координат — вздовж початкового напрямку руху тіла.
66. Тіло падає з висоти $78,4 \text{ м}$. Визначте його переміщення за останню секунду падіння.
67. Тіло падає вертикально вниз з висоти 20 м без початкової швидкості. Визначте: а) шлях, що пройшло тіло за останню секунду падіння; б) середню швидкість руху на всьому шляху; в) середню швидкість на другій половині шляху.
68. Тіло вільно падає з висоти 180 м . Розділіть цю відстань на такі ділянки, щоб тіло пролітало їх за однакові інтервали часу.
69. При вільному падінні перше тіло було в польоті вдвічі довше, ніж друге. Порівняйте кінцеві швидкості і переміщення.
70. Тіло кинули вгору з початковою швидкістю v_0 . Коли воно досягло найвищої точки, з тієї самої точки кинули інше тіло з швидкістю v_0 . На якій висоті тіла зустрінуться?

§ 14 РІВНОМІРНИЙ РУХ ТІЛА ПО КОЛУ. ЛІНІЙНА І КУТОВА ШВИДКОСТІ. ПЕРІОД І ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ

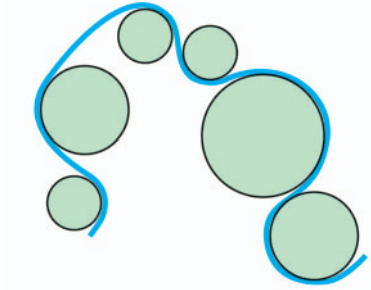
Більш поширеними за прямолінійні є криволінійні рухи, що відбуваються під дією сил, напрямлених під кутом до швидкості. Серед цих рухів виділимо рух матеріальної точки по колу, оскільки цей рух є дуже поширеним у природі і техніці. По колу рухаються різні частини обертових машин. У тракторі, наприклад, спостерігаємо обертання колінчастого вала, цілої системи зубчастих коліс, що передають рух від колінчастого вала до різних механізмів, шківів, барабанів тощо. У літаку обертаються гвинти, колеса шасі (мал. 40).

Будь-який криволінійний рух тіл можна звести до руху по дугах — частинах кіл різних радіусів (мал. 41). Тобто криволінійний рух є комбінацією послідовних рухів тіла по колу та ділянок, на яких тіло рухається прямолінійно.

Розглянемо найпростіший криволінійний рух тіла — рух по колу з незмінною за модулем швидкістю.



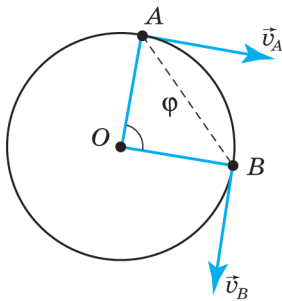
Мал. 40



Мал. 41



Мал. 42



Мал. 43

Рівномірним рухом тіла по колу називають такий рух, при якому швидкість тіла змінюється за напрямом, але не змінюється за значенням.

Введемо основні величини, які характеризують рівномірний рух по колу.

Миттєва швидкість руху тіла при такому русі в кожній точці напрямлена по дотичній до траєкторії. Підтвердженням цього може бути відлітання шматочків речовини (іскор) від точильного каменя (мал. 42), а також бризок від коліс велосипеда або автомобіля.

Припустимо, що точка рівномірно рухається по колу радіуса R і за певний час t переміщується з точки A в точку B (мал. 43).

Як видно з малюнка, лінійна швидкість руху тіла за модулем залишається сталою ($v_A = v_B = v$), але її напрям весь час змінюється. Тому в даному разі користуються поняттям миттєвої швидкості, яка визначає швидкість руху тіла в точці і напрямлена по дотичній до дуги в даній точці (точки A і B).

Отже, **лінійна швидкість тіла, що рівномірно обертається по колу, весь час змінюється за напрямом і у будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до дуги цього кола, має сталі значення.**

Користуючись визначенням швидкості руху тіла для рівномірного прямолінійного руху, з'ясуємо, як визначається лінійна швидкість тіла у рівномірному русі по колу.

Ми знаємо, що $v = \frac{l}{t}$, де l — пройдений тілом шлях. Тіло здійснює за певний час t один оберт, проходячи шлях, що дорівнює довжині кола $l = 2\pi R$. Тоді лінійна швидкість руху тіла під час рівномірного руху по колу визначається за формулою

$$v = \frac{2\pi R}{t}, \quad (1.23)$$

де v — лінійна швидкість руху тіла по колу; R — радіус кола; t — час руху тіла.

Проте лінійна швидкість тіла не дає можливості судити про швидкість обертання всіх його точок, оскільки вона змінюється при віддаленні точки від осі обертання. Сталим (незмінним) для всіх точок на тілі, що обертається, є відношення кута φ , який утворюється при переміщенні радіуса R з положення A в положення B (кутове переміщення $\Delta\varphi$), до інтервалу часу Δt , протягом якого це переміщення відбувається.

Цю сталу фізичну величину називають кутовою швидкістю.

Кутова швидкість тіла — це фізична величина, яка показує, як швидко змінюється кут повороту тіла, і визначається відношенням зміни кута $\Delta\varphi$ до інтервалу часу Δt , за який ця зміна відбулася:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.24)$$

Якщо за час t кут повороту тіла, яке обертається рівномірно, дорівнює φ , то кутову швидкість визначаємо із співвідношення:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \quad (1.25)$$

Одиницею кутової швидкості в СІ є **радіан за секунду (1 рад/с)**. 1 рад/с дорівнює кутовій швидкості такого рівномірного руху по колу, під час якого за 1 секунду здійснюється кутове переміщення на 1 радіан.

Для тіл, що здійснюють багато обертів, які виконуються з періодичною залежністю (штучні супутники, деталі обертових механізмів тощо), вводять величини, які називають **періодом обертання і частотою обертання**.

Період обертання — це час, протягом якого тіло робить один повний оберт по колу.

Якщо тіло робить N обертів, то період обертання має вигляд

$$T = \frac{t}{N}, \quad (1.26)$$

де t — час обертання; N — кількість зроблених обертів.

Одиницею періоду обертання T тіла є **секунда (с)**.

Величину, обернену до періоду обертання, називають **частотою обертання**:

$$n = \frac{1}{T}. \quad (1.27)$$

Частота обертання тіла n визначає кількість обертів тіла навколо центра обертання за 1 секунду:

$$n = \frac{N}{t}. \quad (1.28)$$

Одиницею частоти в СІ є **оберт за секунду (об/с)**. 1 об/с дорівнює такій частоті обертання, при якій тіло за 1 секунду робить 1 оберт. Використовують й інші одиниці, наприклад оберт за хвилину: $1 \text{ об/хв} = 1/60 \text{ об/с}$.

Оскільки експериментально встановлено, що кутове переміщення за час, що дорівнює періоду T , становить 2π рад, то кутова швидкість може бути визначена через період і частоту обертання:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \omega = 2\pi n. \quad (1.29)$$

Якщо пригадати, що лінійна швидкість тіла $v = \frac{2\pi R}{T}$, то можна знайти її зв'язок з кутовою швидкістю:

$$v = \omega R. \quad (1.30)$$

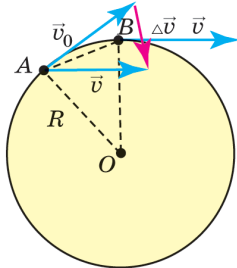
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Чому серед криволінійних рухів ми виділяємо рух по колу?
2. Що є основною характеристикою обертального руху?
3. Чим зумовлене введення кутової швидкості як характеристики руху тіла при обертанні?
4. Дайте визначення лінійної та кутової швидкостей під час рівномірного руху тіла по колу.
5. Як пов'язані між собою період і частота обертання тіла?
6. Виразіть лінійну та кутову швидкості через період або частоту обертання тіла.
7. Відобразіть лінійну швидкість тіла через його кутову швидкість.

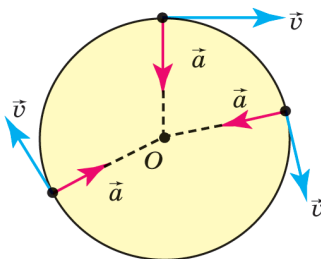
§ 15 ДОЦЕНТРОВЕ ПРИСКОРЕННЯ ТІЛА

Рівномірний рух тіла по колу — це рух з прискоренням, хоча за модулем швидкість руху тіла не змінюється. Постає завдання — з'ясувати, як напрямлене і чому дорівнює це прискорення.

Вам вже відомо, що прискорення визначається рівністю $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t}$.



Мал. 44



Мал. 45

Зрозуміло, що вектор \vec{a} напрямлений так само, як вектор $\Delta \vec{v}$, оскільки t — величина скалярна.

Вважаємо, що тіло рухається по колу, яке має радіус R , і у деякий момент часу, який ми візьмемо за початковий ($t_0 = 0$), воно знаходиться в точці A (мал. 44). Швидкість руху тіла \vec{v}_0 в цій точці напрямлена по дотичній. У точці B , в якій тіло, рухаючись по колу, опиниться через дуже малий інтервал часу t , швидкість \vec{v} також буде напрямлена по дотичній. Перенесемо вектор \vec{v} паралельно самому собі так, щоб він і вектор \vec{v}_0 виходили з точки A , і з'єднаємо кінці обох векторів відрізком прямої, напрямивши його від \vec{v}_0 до \vec{v} . Направлений відрізок i є вектор $\Delta \vec{v}$. На мал. 44 видно, що вектор $\Delta \vec{v}$ напрямлений всередину кола. Якщо точки A і B гранично близькі одна до одної, то вектор $\Delta \vec{v}$, перенесений у точку A , буде напрямлений до центра кола. Туди ж буде напрямлений і вектор прискорення \vec{a} .

Таким чином, при рівномірному русі тіла по колу його прискорення в усіх точках кола напрямлене до центра. Його так і називають **доцентровим прискоренням**. Воно позначається літерою a .

Прискорення тіла, яке рівномірно рухається по колу, у будь-якій його точці доцентрове, тобто напрямлене по радіусу кола до його центра.

У будь-якій точці доцентрове прискорення перпендикулярне до лінійної швидкості. Ця особливість прискорення при рівномірному русі по колу показана на мал. 45.

Значення (модуль) прискорення визначимо з мал. 44. Трикутник, складений з векторів \vec{v}_0 , \vec{v} і $\Delta\vec{v}$, є рівнобедрений, оскільки $v_0 = v$. Трикутник OAB також рівнобедрений, тому що сторони OA і OB — радіуси кола. Куты при вершинах обох трикутників рівні, оскільки вони утворені взаємно перпендикулярними сторонами. Тому трикутники подібні, як рівнобедрені з рівними кутами при вершинах. З подібності трикутників випливає пропорційність подібних сторін:

$$\frac{\Delta v}{AB} = \frac{v}{R}.$$

Якщо час руху від A до B дуже малий, то точки A і B дуже близькі одна до одної, отже хорда AB не буде відрізнятися від довжини дуги AB . Тоді довжина дуги AB — це шлях, що пройшло тіло зі сталою за модулем швидкістю v . Він дорівнює vt . Тому можна записати:

$$\frac{\Delta v}{vt} = \frac{v}{R}, \text{ або } \frac{\Delta v}{t} = \frac{v^2}{R}.$$

Оскільки інтервал часу в даному випадку дуже малий, то $\frac{\Delta v}{t}$ є модуль прискорення. Таким чином,

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (1.31)$$

Згадаємо, що рівномірний рух по колу цікавив нас тому, що всякий рух по криволінійній траєкторії можна зобразити як рух по дугах кіл різних радіусів. Отже, ми можемо сказати, що у будь-якій точці криволінійної траєкторії тіло рухається з прискоренням, напрямленим до центра того кола, частиною якого є ділянка траєкторії, що містить у собі цю точку. Модуль же прискорення залежить від швидкості тіла і від радіуса відповідного кола.

Знаючи, що $v = \omega R$, формулу для розрахунку доцентрового прискорення можна записати у вигляді

$$a = \omega^2 R. \quad (1.32)$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як напрямлене прискорення тіла, що рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю?
2. Чи можна вважати доцентрове прискорення сталим, а рівномірний рух по колу рівноприскореним?

3. Якщо під час руху тіла по колу модуль його швидкості змінюється, чи буде прискорення тіла напрямлене до центра кола?
4. Дайте визначення доцентрового прискорення тіла.
5. За якими формулами визначається доцентрове прискорення тіла?
6. Катер зі спортсменом на водних лижах рухається по колу. Спортсмен може рухатися за катером по тому самому колу, за колом і всередині кола. Яке співвідношення швидкостей руху спортсмена і катера в цих трьох випадках?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Електродвигун, зв'язаний ременною передачею з токарним верстатом, обертається з частотою 980 об/хв. Діаметр шківів, надітих на вал двигуна, дорівнює 10 см. Визначте діаметр шківів, надітих на вал верстата, якщо частота обертання вала 300 об/хв. Яка кутова швидкість обертання шківів верстата?

Дано:
 $n_1 = 980 \text{ об/хв} = 16,3 \text{ об/с}$
 $n_2 = 300 \text{ об/хв} = 5 \text{ об/с}$
 $d_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$

$d_2 = ?$ $\omega = ?$

Розв'язання

Якщо шківів з'єднані перекидним ременем, який приводить їх у рух без проковзування, то $v_1 = v_2$. Тому відношення їх частот обернено пропорційне до відношення їх діаметрів:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow d_2 = d_1 \frac{n_1}{n_2}$$

Підставимо значення відомих величин: $d_2 = 0,1 \text{ м} \frac{16,3 \text{ об/с}}{5 \text{ об/с}} = 0,3 \text{ м}$.

Кутова швидкість шківів верстата $\omega = 2\pi n_2$. Отже, $\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \text{ об/с} = 31,4 \text{ рад/с}$.

В і д п о в і д ь: $d_2 = 0,3 \text{ м}$; $\omega = 31,4 \text{ рад/с}$.

2. Яка швидкість руху автомобіля, якщо його колеса радіусом 30 см роблять 600 об/хв? Визначте доцентрове прискорення коліс автомобіля.

Дано:
 $R = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$
 $n = 600 \text{ об/хв} = 10 \text{ об/с}$

$v = ?$ $a = ?$

Розв'язання

Використовуємо формули $v = \frac{2\pi R}{T}$ і $n = \frac{1}{T}$.

Тоді $v = 2\pi Rn$. Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \text{ м} \cdot 10 \text{ об/с} = 18,84 \text{ м/с}$$

Для визначення прискорення коліс використаємо формулу $a = \frac{v^2}{R}$.

$$\text{Тоді } a = \frac{18,84 \text{ м/с}^2 \cdot 18,84 \text{ м/с}^2}{0,3 \text{ м}} = 1183 \text{ м/с}^2$$

В і д п о в і д ь: $v = 18,84 \text{ м/с}$; $a = 1183 \text{ м/с}^2$.

Рівень А

71. Частота обертання вала генератора вітрогенератора дорівнює 30 об/хв, якоря електродвигуна 1500 об/хв, барабана сепаратора 8400 об/хв, шпинделя шліфувального верстата 96 000 об/хв. Обчисліть їх періоди обертання.
72. Частота обертання повітряного гвинта літака 1500 об/хв. Скільки обертів робить гвинт на шляху 90 км при швидкості польоту 180 км/год?
73. Період обертання платформи карусельного верстата 4 с. Визначте швидкість крайніх точок платформи, що віддалені від осі обертання на 2 м.
74. Діаметр передніх коліс трактора у 2 рази менший, ніж задніх. Порівняйте частоти обертання коліс під час руху трактора.
75. Період обертання Місяця навколо Землі дорівнює 27,3 доби. Вважаючи орбіту Місяця колом радіуса 385000 км, визначте швидкість руху Місяця по орбіті і його прискорення.
76. Ротор турбіни, діаметр якої 40 см, обертається з частотою 12000 хв⁻¹. Яке доцентрове прискорення кінців лопаток турбіни?
77. Швидкість точок робочої поверхні наждачного круга, який має діаметр 300 мм, не повинна перевищувати 35 м/с. Чи можна насадити цей круг на вал електродвигуна, що робить 1400 об/хв? 2800 об/хв?
78. Якщо радіус колової орбіти штучного супутника Землі збільшити в 4 рази, то його період обертання збільшиться у 8 разів. У скільки разів зміниться швидкість руху супутника по орбіті?
79. Секундна стрілка годинника зробила 5 обертів. Визначте кут повороту кінця стрілки і кутову швидкість руху.
80. Визначте кутові швидкості валів, які обертаються з періодами 10 і 0,050 с.

Рівень В

81. Колесо велосипеда має радіус 40 см. З якою швидкістю їде велосипедист, якщо колесо робить 120 об/хв? Чому дорівнює період обертання колеса?
82. Лінійна швидкість точок обода диска, що обертається, дорівнює 3 м/с, а точок, що лежать на відстані 10 см від обода, дорівнює 2 м/с. Визначте частоту обертання диска.
83. Хвилинна стрілка годинника втричі довша за секундну. Визначте відношення лінійних швидкостей кінців стрілок.
84. Яку відстань проїде велосипедист за 60 обертів педалей, якщо діаметр колеса 70 см, ведуча шестерня має 48, а ведена — 18 зубців?
85. Дитячий заводний автомобіль, рухаючись рівномірно, пройшов відстань l за час t . Визначте частоту обертання n і доцентрове прискорення точок $a_{\text{доц}}$ на ободі колеса, якщо його діаметр дорівнює d . Якщо є можливість, конкретні дані задачі візьміть з проведених дослідів.
86. Визначте радіус R колеса, якщо при його обертанні лінійна швидкість руху точки на ободі дорівнює 6 м/с, а швидкість точки, що лежить ближче до осі обертання на 15 см, дорівнює 5,5 м/с.
87. Вісь колеса, яке обертається, рухається поступально в горизонтальному напрямі зі швидкістю v . Вісь горизонтальна і напрям її руху пер-

- пендикулярний до неї самої. Визначте миттєву швидкість верхньої точки обода колеса v_1 , якщо миттєва швидкість нижньої точки v_2 .
88. З якою швидкістю автомобіль повинен проїжджати середину опуклого мосту радіусом 40 м, щоб доцентрове прискорення дорівнювало прискоренню вільного падіння?
89. Автомобіль рухається по криволінійній траєкторії зі сталою за модулем швидкістю. Чи можна стверджувати, що його прискорення в цьому випадку дорівнює нулю? Відповідь обґрунтуйте.



Історична довідка

Біля витоків кінематики: апорії Зенона

Років за 500 до нашої ери у давньогрецькому місті Єллі (на півдні Італії) жив знаменитий філософ Зенон. Знаменитий він був тим, що відкидав можливість пізнання світу за допомогою відчуттів людини: «вірити можна лише розуму» — казав він. За Зеноном, світ є незмінний і нерухомий. Так, відкидаючи наші відчуття, стверджував Зенон, неможливо за допомогою розуму довести існування руху у світі. Для підтвердження своїх слів Зенон вибрав метод доведення від абсурду. Розглянемо апорії Зенона (з грецької *апорія* — безвихідне становище, неподоланна трудність).

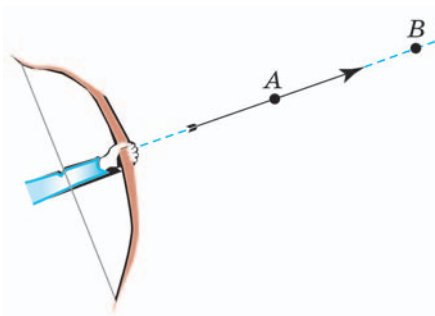
Руху немає... (або про рух взагалі). Щоб пройти відстань, потрібно для початку пройти її половину, а ще раніше потрібно пройти одну четверту частину, і т.д. Продовжуючи поділ навпіл все нових і нових відрізків, ми ніколи не закінчимо цей поділ, а отже, і ніколи не розпочнемо рух.

Помилка Зенона була у тому, що він безмежність поділу відрізка ототожнював із нескінченністю часу на проходження цього відрізка.

Ахіллес та черепаха (або про рівномірний прямолінійний рух). Швидкий Ахіллес (герой Троянської війни) ніколи не зможе наздогнати черепаха, хоча остання, як відомо, вважається зразком повільності руху. Так, коли Ахіллес проходить відстань, що розділяє їх на початку, черепаха не чекає, а продовжує повзти. А тому Ахіллесу потрібно пройти початкову відстань і утворену нову. Але коли Ахіллес пройде і нову відстань, то черепаха, продовжуючи повзти, знову втече від Ахіллеса. І останньому знову потрібно буде доганяти черепаха, і так можна продовжувати міркування до безкінечності, доводячи, що Ахіллес ніколи не дожене черепаха.

Даний парадокс легко заперечити, якщо знати формулу рівномірного руху і вміти розв'язувати рівняння з одним невідомим. Звичайно, Ахіллес дожене черепаха через деякий час t . За цей час Ахіллес пройде відстань, яка визначатиметься добутком $v_A t$, де v_A — швидкість руху Ахіллеса. Черепаха за цей самий час проповзе відстань, що визначатиметься добутком $v_C t$, де v_C — швидкість руху черепахи. Якщо початкову відстань, що розділяє черепаха і Ахіллеса,

позначити d , то можна записати: $v_A t = v_C t + d$. Звідси знаходимо: $t = \frac{d}{v_A - v_C}$.



Мал. 46

Про стрілу (або про відносність руху). Випущена із лука стріла (мал. 46) у якийсь даний момент часу знаходиться в точці А. У цей момент вона перебуває у спокої. Коли стріла досягне точки В, то можна стверджувати, що вона теж буде перебувати у спокої у цей момент у цій точці В. В якій би точці ми не застали стрілу, вона буде перебувати у спокої у той

момент, у який вона знаходитиметься у цій точці. Отже, стріла перебуває в спокої у будь-який момент часу, а тому перебуває у спокої взагалі.

У чому помилка Зенона? Очевидно, що вчений не розрізняв точки на стрілі і поза стрілою. Так, звичайно, стріла нерухома відносно точки A , взятої на самій стрілі, як нерухомі предмети один відносно одного у вагоні потяга, що рухається.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Чому стіл у класі одночасно перебуває у спокої й русі?
2. Чому шлях, пройдений тілом під час руху, є скалярною величиною?
3. Чому не можна робити обчислення за формулами, записаними у векторній формі?
4. Чому формула для розрахунку швидкості рівнозмінного руху тіла має два знаки: $v_x = v_{0x} \pm a_x t$?
5. Чому графіком швидкості рівноприскореного руху є пряма лінія?
6. Чому графік швидкості рівносповільненого руху тіла ніколи не проходить через початок координат?
7. Чому вільне падіння — це рівноприскорений рух?
8. Чому швидкість руху тіла 5 м/с у прямолінійному рівномірному русі — це не те саме, що 5 м/с — швидкість рівномірного руху тіла по колу?
9. Чому учень припустився грубої помилки, коли відповів так: «Переміщення матеріальної точки — це відрізок прямої, що з'єднує початкову точку руху з кінцевою»?
10. Як можна визначити швидкість плавця відносно берега, якщо швидкість течії v_1 , а швидкість плавця відносно води v_2 і напрямлена перпендикулярно до течії?
11. При будь-якому нерівномірному русі тіла змінюється його швидкість. Як прискорення характеризує цю зміну?
12. Виведіть формули, що виражають залежність між доцентровим прискоренням, періодом і частотою обертання.

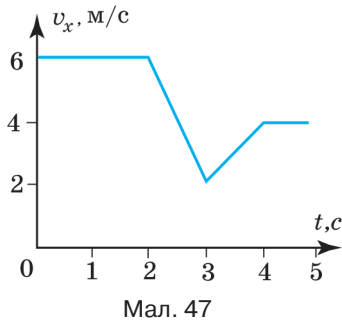
Що я знаю і вмію робити

Я знаю, що таке відносність руху

1. Два поїзди рухаються назустріч один одному зі швидкостями 54 та 72 км/год. Пасажир першого потяга помічає, що другий потяг рухається повз нього протягом 4 с. Яка довжина другого потяга?
2. Автомобіль, що рухається рівномірно зі швидкістю 45 км/год, за 10 с проїхав такий самий шлях, як і автобус за 15 с, який рухається в тому самому напрямі. Визначте їх відносну швидкість руху.
3. Швидкість руху човна у n разів більша за швидкість течії. У скільки разів більше часу займає переїзд між двома пунктами проти течії, ніж за течією?

Я знаю, як визначається швидкість руху тіла, час його руху і шлях, який воно проходить

4. Надзвуковий літак летить горизонтально на висоті 4 км. Спостерігач почув звук через 10 с після того, як літак пролетів над ним. Визначте швидкість літака, якщо швидкість звуку 330 м/с.



5. Скільки часу падало тіло, якщо за останню секунду воно пролетіло 58,8 м?

6. Людина кинула камінь у прірву і почула звук падіння через 6 с. Визначте глибину прірви. Швидкість поширення звуку в повітрі 340 м/с.

7. Доведіть, що середня швидкість за даний інтервал часу $\tau = t_2 - t_1$ при рівноприскореному русі дорівнює швидкості у момент $t = t_1 + \frac{\tau}{2}$.

Я вмію розв'язувати задачі на рівномірний рух тіла по колу

8. Радіус робочого колеса гідротурбіни в 8 разів більший, ніж парової, а частота обертання в 40 разів менша. Порівняти лінійні швидкості та прискорення точок ободів коліс турбін.

9. Циліндр радіуса 10 см розташований між двома рейками, які рухаються в один бік зі швидкостями 6 та 4 м/с. Визначте швидкість руху точок на осі циліндра та кутову швидкість його обертання. Розв'яжіть задачу і для випадку, коли рейки рухаються в різні боки.

Я вмію аналізувати і будувати графіки

10. За графіком проекції швидкості руху тіла (мал. 47) побудувати графік проекції прискорення і графік проекції переміщення тіла.

Я вмію робити доведення

11. Доведіть, що при прямолінійному рівноприскореному русі проекції переміщення s_x тіла за послідовні рівні інтервали часу утворюють арифметичну прогресію.

12. Доведіть, що при прямолінійному рівноприскореному русі без початкової швидкості виконується «закон непарних чисел», шляхи, які проходить тіло за послідовні рівні інтервали часу, відносяться, як послідовні непарні числа: $l_1 : l_2 : \dots : l_n = 1 : 3 : \dots : (2n - 1)$.

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

В а р і а н т І

1. Ви знаєте задачу, яка є основою для кінематики: за відомою траєкторією і законом руху визначаються швидкість і зміна цієї швидкості для кожного моменту часу і кожної точки траєкторії (пряма задача). Якими прикладами, наведеними нижче, можна підтвердити цю задачу?

А. При польоті літака напрям швидкості залишався незмінним.

Б. Для руху тіла отримано графік закону руху.

В. Космонавт обертається у центрифугі, радіус якої R . При цьому лінійна швидкість центра мас кабіни залишається сталою і дорівнює v .

Г. Отримана послідовність малих переміщень тіла утворює пряму лінію, тобто рух тіл є прямолінійним.

Д. Таких прикладів немає.

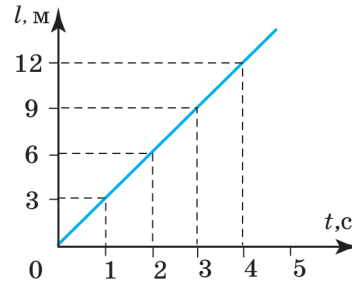
2. На основі дослідів із взаємодії тіл були зроблені висновки. Виберіть помилковий.

А. Прискорення, що отримали взаємодіючі тіла, різні за знаком.

Б. Прискорення можуть бути рівними під час взаємодії однакових тіл і різними для обох тіл.

В. Прискорення для двох взаємодіючих тіл залежать від умов досліду, тому можуть бути різними.

Г. Відношення $\frac{a_1}{a_2} = \text{const}$ не залежить від



Мал. 48

умов досліду, воно залежить тільки від механічних властивостей взаємодіючих тіл.

Д. Під час взаємодії сили взаємно врівноважуються.

3. Під час рівномірного руху пішохід проходить за 10 с шлях 15 м. Який шлях він пройде, рухаючись з тією ж швидкістю, за 2 с?

А. 3 м. Б. 30 м. В. 1,5 м. Г. 7,5 м. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

4. На мал. 48 зображено графік залежності шляху, що проїхав велосипедист, від часу. Визначте за цим графіком шлях, що проїхав велосипедист за інтервал від 1 до 3 с.

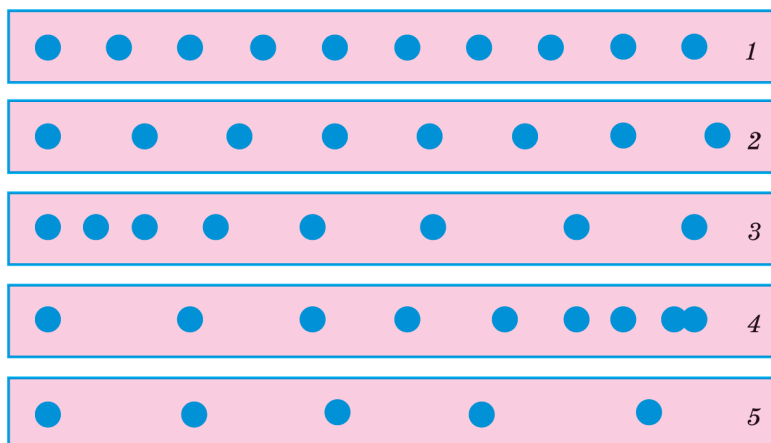
А. 9 м. Б. 6 м. В. 3 м. Г. 12 м. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

5. За графіком, зображеним на мал. 48, визначте швидкість руху велосипедиста в момент часу 2 с.

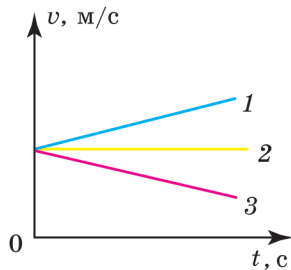
А. 2 м/с. Б. 6 м/с. В. 3 м/с. Г. 12 м/с. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

6. На мал. 49 точками відмічені положення п'яти тіл (1—5), що рухаються зліва направо, через рівні інтервали часу. Інтервали часу між двома відмітками на всіх смужках однакові. На якій смужці зареєстровано рівномірний рух тіла з найбільшою швидкістю?

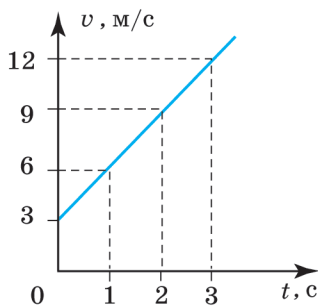
А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.



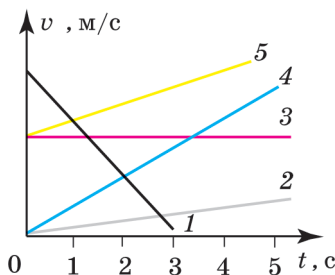
Мал. 49



Мал. 50



Мал. 51



Мал. 52

7. Спортсмен пливе за течією річки. Визначте швидкість руху спортсмена відносно берега річки, якщо швидкість його руху відносно води дорівнює $1,5$ м/с, а швидкість течії річки $0,5$ м/с.

А. $0,5$ м/с. Б. 1 м/с. В. $1,5$ м/с. Г. 2 м/с.
Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

8. На мал. 50 зображені графіки залежності модуль швидкості від часу для трьох тіл, що рухаються прямолінійно. Який із графіків відповідає рівноприскореному руху тіла, при якому напрям його прискорення збігається з напрямом швидкості?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. Всі три графіки. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

9. За графіком залежності модуля швидкості руху тіла від часу (мал. 51), визначте прискорення тіла, що рухається прямолінійно, в момент часу $t = 2$ с.

А. 18 м/с². Б. 9 м/с². В. 3 м/с². Г. $4,5$ м/с².
Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

10. На мал. 52 зображені графіки залежності від часу модулів швидкості руху п'яти тіл. Яке з цих тіл рухається з найбільшою швидкістю в момент часу $t = 2$ с?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

Який із графіків, зображених на мал. 52, відповідає руху тіла з найбільшим за модулем прискоренням?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

11. З якою швидкістю буде рухатися тіло через 3 с після початку вільного падіння? Початкова швидкість руху тіла дорівнює нулю, прискорення вільного падіння 10 м/с².

А. $\approx 3,3$ м/с. Б. 30 м/с. В. 90 м/с. Г. 45 м/с.

Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

12. Початкова швидкість руху тіла під час вільного падіння дорівнює нулю, прискорення вільного падіння 10 м/с². Який шлях пройде тіло за 3 с?

А. $\approx 3,3$ м. Б. 90 м. В. 45 м. Г. Серед відповідей А—В немає правильної.

13. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю за годинниковою стрілкою. Який напрям має швидкість у точці M (мал. 53)?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

14. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Як зміниться доцентрове прискорення тіла при збільшенні його швидкості у 2 рази, якщо радіус кола залишається незмінним?

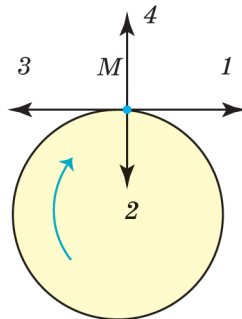
А. Збільшиться у 2 рази.

Б. Зменшиться у 2 рази.

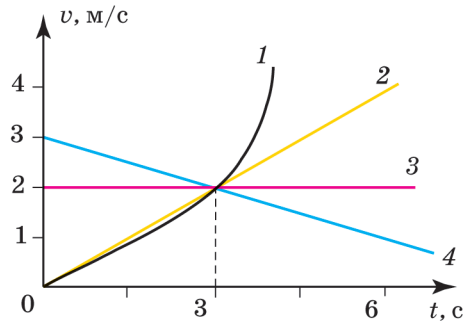
В. Не зміниться.

Г. Зменшиться у 4 рази.

Д. Збільшиться у 4 рази.



Мал. 53



Мал. 54

15. На мал. 54 зображені графіки залежності від часу модулів швидкості руху 4 тіл. Яке з цих тіл пройшло найбільший шлях за інтервал часу від 0 до 3 с?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Усі тіла пройшли однаковий шлях.

16. Чому дорівнює відношення шляхів, пройдених тілом за 1 с і за 2 с після початку вільного падіння?

А. $1 : \sqrt{2}$. Б. $1 : 2$. В. $1 : 3$. Г. $1 : 4$. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

В а р і а н т ІІ

1. Ви знаєте задачу, яка є основою для кінематики: за заданим початковим положенням, початковою швидкістю і відомою для кожного моменту часу зміною швидкості визначається траєкторія і закон руху тіла (обернена задача). Якими прикладами, наведеними нижче, можна підтвердити цю задачу?

А. Під час польоту літака напрям швидкості залишався незмінним.

Б. Для руху тіла отримано графік закону руху.

В. Космонавт обертається у центрифугі, радіус якої R . При цьому лінійна швидкість центра мас кабіни залишається сталою і дорівнює v .

Г. Отримана послідовність малих переміщень тіла утворює пряму лінію, тобто рух тіл є прямолінійним.

Д. Таких прикладів немає.

2. Нижче наведені форми інтерпретації принципу відносності Галілея і висновки з них. Вкажіть помилкове твердження.

А. Принцип відносності означає повну тотожність даного руху в різних інерціальних системах відліку.

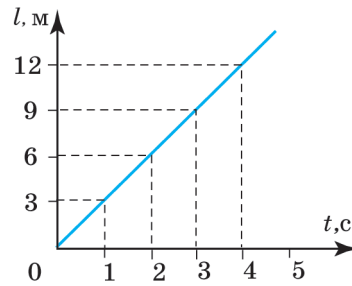
Б. Не можна назвати нерухоме тіло, а також і абсолютно нерухому систему відліку.

В. Усі три закони Ньютона інваріантні відносно інерціальних систем відліку.

Г. Будь-яке механічне явище в усіх інерціальних системах відбувається за одним і тим же законом.

Д. У природі існує безліч інерціальних систем відліку, які «механічно» нічим не відрізняються одна від одної.

3. Під час рівномірного руху пішохід проходить за 6 с шлях 12 м. Який шлях він пройде, рухаючись з тією ж швидкістю, за 3 с?



Мал. 55

А. 2 м. Б. 36 м. В. 4 м. Г. 6 м. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.
 4. На мал. 55 зображено графік залежності шляху, що проїхав велосипедист, від часу. Визначте за цим графіком шлях, що проїхав велосипедист за інтервал від 2 с до 5 с.

А. 6 м. Б. 15 м. В. 9 м. Г. 21 м. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

5. За графіком, зображеним на мал. 55, визначте швидкість руху велосипедиста у момент часу 3 с.

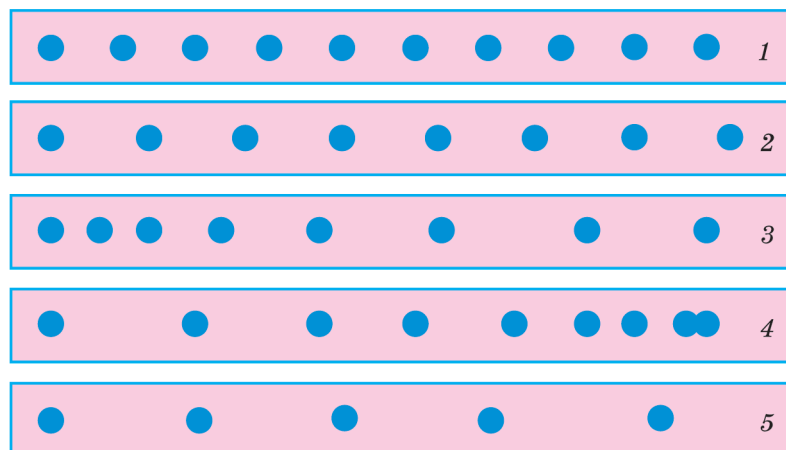
А. 3 м/с. Б. 9 м/с. В. 0 м/с. Г. 27 м/с. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

6. На мал. 56 точками відмічені положення п'яти тіл (1—5), що рухаються зліва направо, через рівні інтервали часу. Інтервали часу між двома відмітками на всіх смужках однакові. На якій смужці зареєстрований рівномірний рух тіла з найменшою швидкістю?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

7. Спортсмен пливе проти течії річки. Визначте швидкість руху спортсмена відносно берега річки, якщо швидкість його руху відносно води дорівнює 1,5 м/с, а швидкість течії річки 0,5 м/с.

А. 0,5 м/с. Б. 1 м/с. В. 1,5 м/с. Г. 2 м/с. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.



Мал. 56

8. На мал. 57 зображені графіки залежності модуль швидкості від часу для трьох тіл, що рухаються прямолінійно. Який із графіків відповідає рівноприскореному руху тіла, коли напрям його прискорення протилежний напрям швидкості?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. Всі три графіки. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

9. За графіком залежності модуля швидкості руху тіла від часу, зображеним на мал. 58, визначте прискорення тіла, що рухається прямолінійно, в момент часу $t = 2$ с.

А. $1,5 \text{ м/с}^2$. Б. $0,5 \text{ м/с}^2$. В. 6 м/с^2 . Г. 3 м/с^2 . Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

10. На мал. 59 зображені графіки залежності від часу модуль швидкості руху п'яти тіл. Яке з цих тіл рухається з найменшою швидкістю в момент часу $t = 1$ с?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

Який із графіків, зображених на мал. 59, відповідає руху тіла з найменшим за модулем, але відмінним від нуля прискоренням?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

11. З якою швидкістю буде рухатися тіло через 4 с після початку вільного падіння? Початкова швидкість руху тіла дорівнює нулю, прискорення вільного падіння 10 м/с^2 .

А. $2,5 \text{ м/с}$. Б. 160 м/с . В. 40 м/с . Г. 80 м/с . Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

12. Початкова швидкість руху тіла під час вільного падіння дорівнює нулю, прискорення вільного падіння 10 м/с^2 . Який шлях пройде тіло за 4 с?

А. 80 м . Б. 160 м . В. $2,5 \text{ м}$. Г. 40 м . Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

13. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю за годинниковою стрілкою. Який напрям має прискорення у точці M (мал. 60)?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

14. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Як зміниться доцентрове прискорення тіла при збільшенні його радіуса у 2 рази і незмінній швидкості руху тіла?

А. Збільшиться у 2 рази.

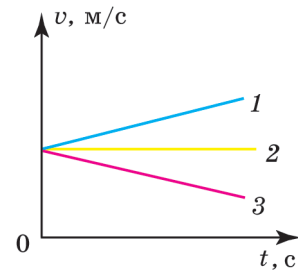
Б. Зменшиться у 2 рази.

В. Не зміниться.

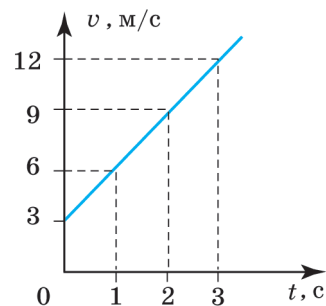
Г. Зменшиться у 4 рази.

Д. Збільшиться у 4 рази.

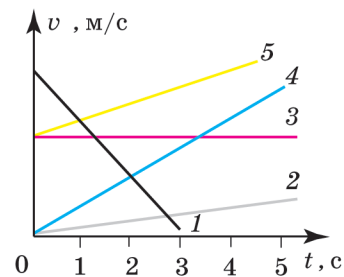
15. На мал. 61 зображені графіки залежності від часу модуль швидкості руху 4 тіл. Яке з цих тіл пройшло найменший шлях за інтервал часу від 0 до 2 с?



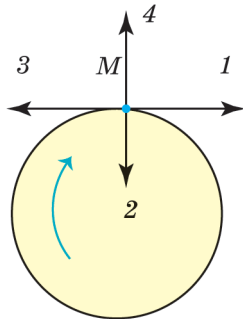
Мал. 57



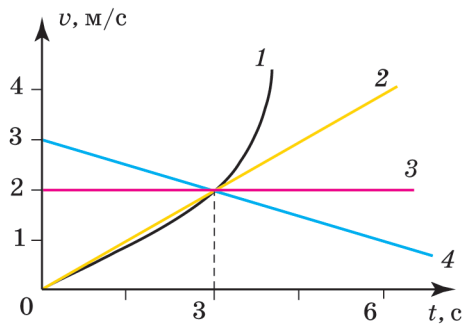
Мал. 58



Мал. 59



Мал. 60



Мал. 61

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Усі тіла пройшли однаковий шлях.

16. Чому дорівнює відношення шляхів, пройдених тілом за 2 с і за 3 с після початку вільного падіння?

А. 2 : 3. Б. $\sqrt{2} : \sqrt{3}$. В. 3 : 5. Г. 4 : 9. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.



Розділ 2 ДИНАМІКА

- Механічна взаємодія тіл
- Сила. Вимірювання сил. Додавання сил
- Перший закон Ньютона. Інерція та інертність
- Інерціальна система відліку. Механічний принцип відносності Галілея
- Другий закон Ньютона
- Третій закон Ньютона. Межі застосування законів Ньютона
- Гравітаційна взаємодія. Закон всесвітнього тяжіння
- Гравітаційна стала
- Сила тяжіння
- Рух тіл під дією сили тяжіння
- Вага тіла. Перевантаження і невагомість
- Штучні супутники Землі. Розвиток космонавтики
- Сила реакції опори. Сили пружності
- Сили тертя
- Рівновага тіл
- Умова рівноваги тіла, що має вісь обертання. Момент сили
- Види рівноваги тіл
- Імпульс тіла
- Закон збереження імпульсу. Реактивний рух
- Механічна енергія. Кінетична і потенціальна енергія
- Закон збереження повної механічної енергії

У розділі «Кінематика» ви ознайомилися з величинами, що використовуються для опису різних рухів, які спостерігаються в навколишньому середовищі. Ви дізналися також, що для розрахунку швидкостей руху тіл, їх переміщень і, нарешті, координат тіл у будь-який момент часу потрібно визначити прискорення. Адже головне, чим відрізняється один рух від іншого, — це прискорення. Так, прямолінійний рівномірний рух відрізняється від інших рухів тим, що прискорення дорівнює нулю при та-

кому русі; рівноприскорений прямолінійний рух — тим, що прискорення за модулем і за напрямом стали; рівномірний рух по колу — тим, що прискорення в будь-якій точці кола напрямлене до центра кола.

Рухи тіл (щодо вибраної системи відліку) починаються і припиняються, вони стають швидшими і повільнішими, змінюються їх напрями. В усіх цих випадках змінюються швидкості рухів, тобто з'являються прискорення. Тепер зрозуміло, наскільки важливо вміти визначати (розраховувати) прискорення. Без цього не можна ні розв'язувати задачі механіки, ні керувати рухом. Але щоб визначати прискорення, потрібно знати, чому і як вони виникають. Фізика взагалі завжди прагне з'ясувати не тільки, як відбувається те або інше явище, а й чому воно відбувається і чому воно відбувається так, а не інакше. У кінематиці ми з'ясували, як відбувається рух (наприклад, з прискоренням або без прискорення). А на питання про те, чому тіла рухаються так, а не інакше, відповідає головна частина механіки — **динаміка**.

Динаміка (з грецької *динаміс* — сила) — розділ механіки, в якому вивчається рух тіл у зв'язку з їх взаємодією з іншими тілами.

Динаміка пояснює, за яких умов тіло рухається так, а не інакше, коли тіло рухається рівномірно, а коли рівноприскорено, коли тіло рухається прямолінійно, а коли криволінійно.

Основою динаміки є закони руху тіл, сформульовані англійським фізиком **І. Ньютоном** (1643—1727) у роботі «Математичні начала натуральної філософії», опублікованій у 1687 р. У цій праці дано визначення основних понять (маса, сила, кількість руху, прискорення), трьох законів механіки, закону всесвітнього тяжіння.

Ньютон, вивчивши роботи своїх попередників у галузі механіки і провівши власні дослідження, увів основні поняття механіки (маса, сила, імпульс тіла тощо) і з їх допомогою сформулював три закони руху, які отримали назву законів Ньютона. За життя Ньютона у різних галузях промисловості почали з'являтися порівняно складні механізми і пристрої (насоси, вантажопідійомники, рудодробарки, ковальські молоти тощо). Техніка, що бурхливо розвивалася, вимагала розв'язання низки наукових проблем, у першу чергу в механіці. Цю роботу значною мірою і виконав Ньютон, який бачив у науці важливий спосіб удосконалення виробництва. Він писав: «Якщо діти будуть добре навчені і виховані досвідченими вчителями, то з часом народ отримає вмілих моряків, кораблебудівельників, архітекторів, інженерів і осіб усіх можливих математичних професій для роботи як на морі, так і на суші».

Ці слова вченого не втратили свого значення і в наш час. Вивчаючи основи динаміки, ви повинні оволодіти її головними поняттями і законами, навчитися розв'язувати задачі і, що особливо важливо, знати як застосувати закони динаміки у техніці. Це допоможе вам у подальшому зрозуміти принципи будови і роботи тих машин і механізмів, з якими доведеться мати справу в повсякденному житті.

§ 16 МЕХАНІЧНА ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ

Ви вже знаєте, що в оточуючому нас світі все знаходиться в безперервному русі та змінюється. Рух — невід'ємна властивість матерії. Немає і не



Мал. 62



Мал. 63

може бути матерії без руху і руху без матерії. Проте, рухаючись, тіла зустрічаються одне з одним і взаємодіють між собою.

Внаслідок взаємодії рух тіл може змінитися. Наприклад, сталева куля, що рівномірно рухалася по прямій лінії, при взаємодії з магнітом починає рухатися по криволінійній траєкторії (мал. 62). Спортсмен, стрибаючи у воду, спочатку летить у повітрі прискорено, а потрапивши у воду, внаслідок взаємодії з нею рухається сповільнено.

Для того щоб глибше зрозуміти закони руху, треба вивчити взаємодію тіл одного з одним, тому взаємодія, так само як і рух, — невід’ємна властивість матерії.

Взаємодія — явище складне. Спочатку розглянемо найбільш прості, знайомі з повсякденного життя випадки взаємодії, причому проаналізуємо лише найпростіші їх сторони, а потім у міру накопичення знань перейдемо до вивчення складніших взаємодій.

Із взаємодією тіл ми стикаємося на кожному кроці. Наведемо приклади, які становлять значний інтерес для розуміння суті цього явища.

Хокейна шайба, взаємодіючи з бортом, змінює напрям свого руху (мал. 63), а борт набуває коливального руху (відтворює звук).

Пожежники повинні міцно тримати брандспойт, тому що вода, витікаючи з нього, відштовхує людину в протилежний бік (мал. 64).

Весляр, що знаходиться в човні, працюючи веслами, взаємодіє з водою (мал. 65). Внаслідок цього човен рухається по воді вперед, а вода відштовхується веслами назад.

Людина розтягує пружину (мал. 66). У цьому випадку взаємодія пружини і рук призводить до деформації пружини.



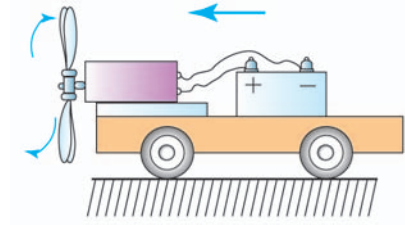
Мал. 64



Мал. 65



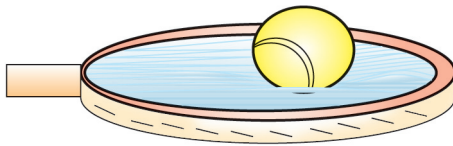
Мал. 66



Мал. 67



Мал. 68



Мал. 69



Мал. 70

Лопаті гвинта, встановлені на візку (мал. 67), взаємодіючи з повітрям, відштовхують частину повітря назад, а самі разом з візком рухаються вперед.

Спортсмен, що стоїть на дошці трампліна для стрибків у воду, згинає її (мал. 68). Як і в попередньому випадку, взаємодія тіл викликає деформацію.

Наведені приклади свідчать про те, що в процесі взаємодії тіл відбувається зміна швидкості їх руху і вони деформуються. В одних випадках, як, наприклад, при ударі шайби об борт, помітніша зміна швидкості руху (з'являється прискорення), а в інших, наприклад при взаємодії рук людини і пружини, помітніша деформація.

Деформація тіл і зміна їх швидкості руху взаємопов'язані. На мал. 69 наведено кадр із фільму, в якому за допомогою швидкісної зйомки зафіксовано удар тенісної ракетки по м'ячу. Можна спостерігати, що зміна швидкості руху м'яча і його деформація відбуваються одночасно, як і у випадку, коли куля пробиває яблуко (мал. 70).

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Наведіть приклади взаємодії тіл.
2. Що відбувається під час механічної взаємодії тіл?
3. Чому тіла під час своєї взаємодії змінюють стан?

§ 17 СИЛА. ВИМІРЮВАННЯ СИЛ. ДОДАВАННЯ СИЛ

Взаємодія тіл може відбуватися по-різному. Наприклад, одну і ту ж пружину дитина розтягне менше, ніж доросла людина.

Для характеристики взаємодії тіл у фізиці введена особлива величина — **сила**. Поняття сили спочатку застосовувалося для опису мускульних зусиль людини. Наприклад, для того щоб підняти тушу вбитої тварини, витягнути з води рибу, зрушити або прибрати камінь, людині доводилося по-різному напружувати свої м'язи. Так із повсякденного досвіду виникли перші уявлення про міру взаємодії людини з тілами, що оточували її, а згодом — уявлення про силу.

Пізніше поняття сили перейшло в науку. Воно використовується для характеристики взаємодії тіл.

Оскільки при взаємодії тіл може змінюватися швидкість їхнього руху, то силі приписують напрям, що збігається з напрямом прискорення, якого набуває тіло внаслідок взаємодії. Пряму лінію, вздовж якої діє сила, називають **лінією дії сили** (мал. 71).

Таким чином, **силою називають векторну фізичну величину, що характеризує механічну дію одного тіла на інше і є мірою цієї дії**.

Як вам відомо з 8 класу, одиницею сили в СІ є **ньютон (Н)**. Вона названа на честь **І. Ньютона**.

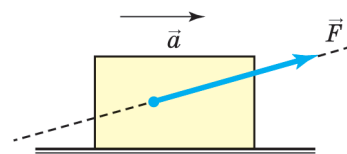
Слід пам'ятати, що термін «сила» завжди пов'язаний із взаємодією тіл і є його кількісною мірою.

Припустимо, що ви прочитали таке речення: «На тіло масою m діє сила \vec{F} ». Це означає, що на тіло діє якесь інше тіло, тобто тіло масою m взаємодіє з деяким тілом і міра цієї взаємодії дорівнює \vec{F} .

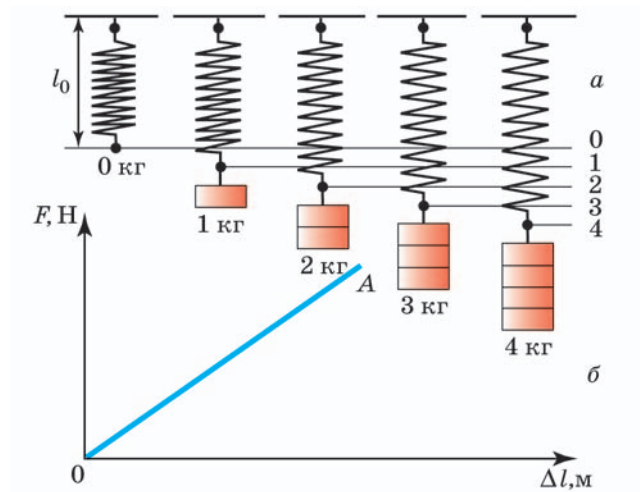
Якщо деяке тіло масою m_1 набуває прискорення \vec{a}_1 , то це викликано тим, що на нього подіяло інше тіло масою m_2 , яке, у свою чергу, також одержує прискорення \vec{a}_2 . Отже, можна записати

$$\vec{a}_1 = \frac{m_2}{m_1} \vec{a}_2. \quad (2.1)$$

З формули (2.1) випливає, що не можна вивчити рух і обчислити прискорення тільки одного тіла, обов'язково потрібно знати масу і прискорення іншого тіла. Проте на практиці, нас буде цікавити рух саме прискореного тіла, а не того тіла або тіл, які на нього діють, надаючи йому прискорення. Наприклад, коли артилерійський снаряд після пострілу вилітає зі ствола гармати, він взаємодіє з Землею і повітрям, у якому пролітає. І Земля, і повітря



Мал. 71



Мал. 72

надають снаряду прискорення і при цьому самі отримують певні прискорення. Проте артилеристу важливо знати прискорення тільки снаряда. Йому не потрібно цікавитися масами і прискореннями Землі і повітря. Тому обчислюють прискорення лише одного тіла, рух якого вивчається.

Вплив тіла, яке надає прискорення, коротко називають силою, що діє на прискорюване тіло. І замість того, щоб говорити, що прискорення тіла викликане дією на нього іншого тіла, говорять, що **прискорення викликане прикладеною до тіла (або діючою на нього) силою.**

Оскільки внаслідок взаємодії тіл з'являються прискорення і деформація тіл, то про силу можна судити і за прискоренням, і за деформацією. Тому необхідно докладніше і ретельніше вивчати деформації, а також прискорення тіл, яких вони набувають під час взаємодії. Почнемо з вивчення деформацій.

Проведемо дослід. До штатива підвісимо пружину, наприкінці якої є петля, куди можна підвішувати важки (мал. 72, а). Біля краю петлі встановимо індикатор, що фіксує довжину пружини. У вільному стані позначимо довжину пружини l_0 .

Підвісивши один з важків до пружини, виявимо, що довжина пружини дещо збільшилася. Збільшуючи число підвішених до пружини важків у 2, 3, 4 рази, зазначимо, що у стільки ж разів збільшується і видовження пружини Δl , яке називають **абсолютним видовженням**.

Іншими словами, абсолютне видовження прямо пропорційне силі, що діє на пружину. Це можна записати так: $\Delta l \sim F$. Знак « \sim » означає «пропорційно».

Якщо за даними дослідів побудувати графік залежності видовження пружини від сили, що деформує її, то графік цієї залежності являтиме собою пряму лінію OA (мал. 72, б).

Знімаючи поступово важки, виявимо, що пропорційно зменшується і видовження. Після того, як повністю знімемо навантаження, пружина буде мати таку саму довжину l_0 , як і до навантаження.

Деформацію тіла, що зникає після зняття з нього навантаження, називають пружною.

Узагальнюючи аналогічні дослідження, англійський фізик **Р. Гук** прийшов до висновку, що завжди абсолютне видовження при пружних деформаціях прямо пропорційне прикладеній силі (закон Гука):

$$\Delta l = \frac{1}{k} F, \quad (2.2)$$

де k — коефіцієнт, що характеризує пружину і називається жорсткістю.

Явище пружної деформації використовується у приладах для вимірювання сили — **динамометрах**. Конструкції динамометрів різноманітні (мал. 73), але принцип роботи їх однаковий: у них використана властивість тіл видовжуватися, згинатися або стискатися при пружній деформації прямо пропорційно прикладеній силі.

Ви вже знаєте, що сила є векторною величиною, тому у випадку, коли на матеріальну точку діють декілька сил, вони додаються геометрично.

Силу, яка замінює дію на матеріальну точку декількох сил, називають рівнодійною.

Рівнодійна сила \vec{R} (мал. 74) дорівнює геометричній сумі сил, що діють на човен.

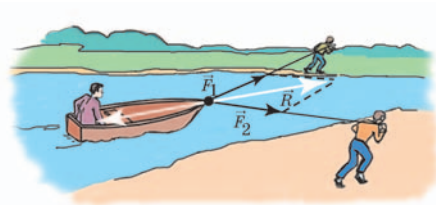
Проте як знайти рівнодійну, коли дві сили (або кілька сил) діють на різні точки твердого тіла (мал. 75, а)? У цьому випадку правило паралелограма застосовувати безпосередньо не можна.

Якщо тверде тіло практично не деформується під дією прикладених до нього сил, то деформацією тіла можна знехтувати і вважати тіло недеформованим. Такі тіла у фізиці називають абсолютно твердими. Ця абстракція дає змогу не розглядати деформацію тіла. Тоді точки прикладання сил можна перенести в будь-які інші точки тіла вздовж лінії дії сили.

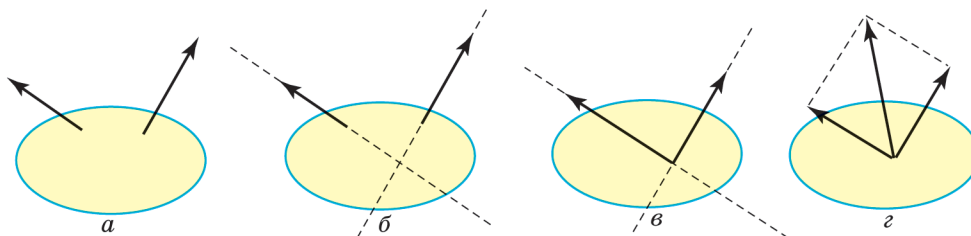
Отже, щоб знайти рівнодійну кількох сил, що діють на різні точки твердого тіла, потрібно: 1) провести лінії дії цих сил (мал. 75, б); 2) перенести точки прикладання сил у точку перетину їх ліній дії (мал. 75, в); 3) знайти



Мал. 73



Мал. 74



Мал. 75

рівнодійну за правилом додавання векторів (мал. 75, з). Може статися так, що лінії дії сил перетинаються не в одній, а у різних точках. У цьому випадку треба додати ті сили, лінії дії яких перетинаються, а потім додати отримані рівнодійні.

Рівнодійну має не кожна система сил. Наприклад, не мають рівнодійної: а) дві рівні паралельні сили, протилежно напрямлені; б) сили, що не лежать в одній площині.

Дві сили, що діють на тверде тіло, взаємно врівноважуються тоді і тільки тоді, коли вони рівні за модулем, діють по одній прямій і напрямлені у протилежні боки.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що у фізиці розуміють під словом «сила»?
2. Що таке сила?
3. Сила — величина скалярна чи векторна?
4. Тіло, кинуте вертикально вгору, рухається з прискоренням. Яка сила надає тілу прискорення? Яке тіло діє на нього з цією силою? Куди напрямлені сила і прискорення руху тіла? Як напрямлена швидкість руху тіла у цьому русі?
5. Якими приладами вимірюють сили?
6. Яку силу називають рівнодійною?
7. На матеріальну точку під кутом 60° одна до одної діють три сили по 100 Н кожна. Чому дорівнюють їх рівнодійна і сила, що їх врівноважує?

Лабораторна робота № 2

Вимірювання сил

Мета роботи: навчитися вимірювати сили, що діють на взаємодіючі тіла.

Поради до виконання роботи

У даній роботі основним вимірювальним приладом є динамометр, який має похибку $\Delta_d = 0,05$ Н, що і дорівнює похибці вимірювання, коли стрілка динамометра збігається з рисою шкали. Якщо ж стрілка в процесі вимірювання не збігається з рисою шкали (або коливається), то похибка вимірювання сили дорівнює $\Delta F = 0,1$ Н. Отже, результати слід записувати у вигляді: $F = F_{\text{вим}} + \Delta F$.

Прилади і матеріали: динамометр Бакушинського, штатив з лапкою і муфтою, трибометр (дерев'яна лінійка, дерев'яний брусок, дерев'яний циліндр), набір важків, металевий циліндр, посудина з водою.

Хід роботи

1. Розгляньте динамометр, визначте ціну поділки шкали динамометра.
2. Візьміть дерев'яний брусок і циліндр, виміряйте за допомогою динамометра силу тяжіння, яка на них діє. Запишіть результати.
3. Покладіть на стіл дерев'яну лінійку. Рухайте рівномірно по ній брусок, виміряйте силу, з якою ви тягнете брусок. Навантажуючи брусок важками, повторіть досліди. Запишіть результати.
4. Рухайте рівномірно дерев'яний циліндр по дерев'яній лінійці, виміряйте силу, з якою ви його тягнете. Порівняйте з попередніми результатами. Зробіть висновки.

5. Закріпіть дерев'яну лінійку в лапці штатива, утворивши похилу площину. Виконайте досліди з дерев'яним бруском і циліндром, рухаючи їх по похилій площині (вгору і вниз). Змініть нахил похилої площини, повторіть досліди. Зробіть висновки.

6. Підвісьте до динамометра металевий циліндр. Опустіть його у посудину з водою. Прослідкуйте, як змінюються покази динамометра від початку до повного занурення циліндра. Зробіть висновки.

§ 18 ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ІНЕРЦІЯ ТА ІНЕРТНІСТЬ

Щоб знайти причину виникнення прискорень, потрібно звернутися до досліду і спостережень. Але спочатку з'ясуємо, за яких умов тіло рухається без прискорення, тобто коли його швидкість руху з часом не змінюється.

Всяке тіло, рухається воно або знаходиться у стані спокою, не одне в світі. Навколо нього є багато інших тіл — близьких і далеких, великих і малих, таких, що рухаються і не рухаються. Природно припустити, що деякі з них, а може бути що й усі, якимось діють на те тіло, яке ми розглядаємо, якимось впливають на стан його руху. Заздалегідь не можна сказати, які з навколишніх тіл істотно впливають, а які мало впливають на цей стан. Це треба досліджувати у кожному окремому випадку.

Розглянемо спочатку яке-небудь тіло, що перебуває у стані спокою. Прискорення такого тіла, як і його швидкість, дорівнює нулю.

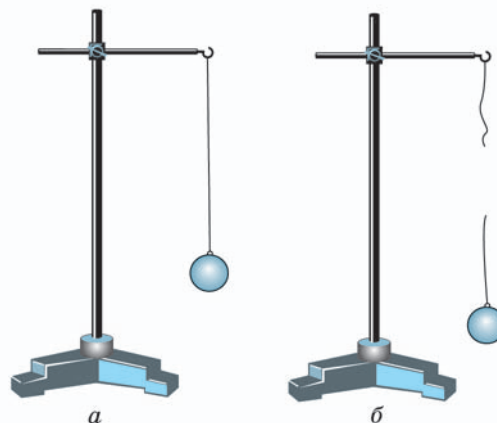
На мал. 76, *а* зображено кульку, підвішену на гумовому шнурі. Відносно Землі вона перебуває у спокої. Біля кульки є безліч різних тіл: шнур, на якому вона висить, стіни кімнати, предмети у ній і в сусідніх приміщеннях і, звичайно, Земля. Зрозуміло, що не всі ці тіла однаково діють на кульку. Якщо, наприклад, прибрати або переставити меблі в кімнаті, то це не буде помітно впливати на кульку. Але якщо перерізати шнур (мал. 76, *б*), кулька відразу почне падати вниз із прискоренням.

Добре відомо, що саме під впливом Землі всі тіла падають вниз. Проте поки шнур не перерізаний, кулька все ж таки перебуває у стані спокою. Цей простий дослід показує, що з усіх тіл, які оточують кульку, тільки два помітно впливають на неї: гумовий шнур і Земля — і їх спільний вплив забезпечує стан спокою кульки. Варто було усунути одне з цих тіл — шнур, і стан спокою порушився.

Якби можна було, зберігши дію розтягнутого шнура, забрати Землю, то це також порушило б спокій кульки: вона почала б рухатися у протилежному напрямі (вгору).

Отже, можна зробити висновок: дії на кульку двох тіл — шнура і Землі — компенсують одна одну.

Коли говорять, що дії двох або кількох тіл компенсують одна



Мал. 76

одну, то це означає, що результат їх спільної дії такий, начебто цих тіл зовсім не існувало.

Розглянутий нами приклад і багато інших аналогічних прикладів дозволяють зробити наступний висновок: **тіло знаходиться в стані спокою, якщо дії на нього інших тіл компенсуються.**

Проте ми знаємо, що рух і спокій відносні. Якщо відносно однієї системи відліку тіло знаходиться в стані спокою, то відносно інших систем відліку тіло може рухатися. Розглянемо, наприклад, шайбу, що лежить на льоду хокейного поля. Шайба знаходиться у спокої відносно льоду (Землі), тому що вплив на неї Землі компенсується впливом льоду. Але для хокеїста, що рухається повз шайбу прямолінійно і рівномірно, шайба також рухається прямолінійно і рівномірно в протилежний бік. Таким чином, одне і те ж тіло (шайба) відносно однієї системи відліку (пов'язаної із Землею) знаходиться у стані спокою, а відносно іншої (пов'язаною з хокеїстом) рухається прямолінійно і рівномірно.

Припустимо, хокеїст ударив по шайбі клюшкою. Внаслідок дуже нетривалої дії ключки шайба починає рухатися, набуваючи деякої швидкості. Цікаво, що після удару, коли дія ключки на шайбу вже припинилася, шайба продовжує свій рух. Тим часом після удару вплив на шайбу інших тіл залишився таким же, як і до удару: як і раніше, дія Землі компенсується дією льоду, а ключка, як і до удару, ніяк не впливає на рух шайби. Шайба ж після удару продовжує рухатися по прямій лінії з майже сталою швидкістю, якої набула у момент удару. Але шайба врешті-решт зупиниться, хоча з досліду відомо, що чим більш гладенькими будуть лід і шайба, тим більш тривалим буде рух шайби. Тому можна здогадатися, якщо зовсім усунути дію льоду, що називається тертям, на рухому шайбу, то шайба продовжуватиме рухатися відносно Землі зі сталою швидкістю безупинно.

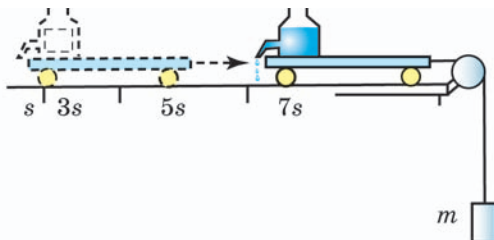
Проте, якщо б поряд з цією шайбою, що рухається рівномірно, рухався хокеїст з такою ж швидкістю, то відносно нього (системи відліку, пов'язаної з ним) шайба знаходилася б у спокої. І в цьому випадку одне і те ж тіло в одній системі відліку (Земля) рухається прямолінійно і рівномірно, а відносно іншої (хокеїст) знаходиться у спокої.

Цей приклад і багато інших подібних до нього підводять нас до одного з основних законів механіки, який називається першим законом руху або **першим законом Ньютона.**

Існують такі системи відліку, відносно яких тіло, що рухається поступально, зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла (або дії інших тіл компенсуються).

Саме явище збереження швидкості руху тіла (зокрема, стану спокою) при компенсації зовнішніх дій на тіло називають **інерцією**. Тому перший закон Ньютона часто називають **законом інерції**. Повсякденний вираз «рух за інерцією» і означає рух тіла зі сталою швидкістю (тобто прямолінійно і рівномірно), коли дії інших тіл компенсуються.

Інертність тіл. Візок з крапельницею поставимо на гладенький го-



Мал. 77

ризонтальний стіл (мал. 77). Прикріпимо до візка нитку, перекинемо її через блок, до другого кінця підвісимо важок m . Відпустивши візок, побачимо, що крапельниця починає рухатися і її швидкість поступово збільшується.

Вивчення розташування крапель на папері ($s_1 : s_2 : s_3 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$) свідчить, що візок рухався рівноприскорено.

Поступово збільшуються і швидкості руху автомобілів і залізничних поїздів, що рушають з місця. Багато хто з вас бачив по телебаченню запуск ракет. Ви, ймовірно, звернули увагу на те, що швидкість ракети-носія змінюється не ривком, а поступово.

Поступово зростає і швидкість санок (або лижника) при спуску з гори. Так само поступово змінюється і швидкість руху тіл при гальмуванні: не можуть зупинитися миттєво автомобіль біля перехрестя, поїзд біля семафора, спортсмен на фініші.

Описаний вище дослід і спостереження, а також повсякденна практика свідчать про те, що всі тіла мають загальну властивість: швидкість руху тіл у процесі їх взаємодії змінюється поступово і для її зміни потрібний певний час. Ця властивість тіл отримала назву **інертності**.

Інертністю називають властивість тіл, яка виявляється в тому, що швидкість їх руху залишається незмінною до тих пір, поки на них не подіють інші тіла. У процесі ж взаємодії їх швидкість не може змінитися миттєво, а змінюється поступово.

Всі тіла інертні. Але інертність різних тіл неоднакова. Із двох взаємодіючих тіл інертність більша у того тіла, яке внаслідок взаємодії набуде меншого прискорення. Так, при пострілі рушниця набуває меншого прискорення, ніж куля. Отже, інертність рушниці більша за інертність кулі. При взаємному відштовхуванні дорослого ковзаняра і дитини дорослий ковзаняр отримує менше прискорення, ніж дитина. Це свідчить про те, що інертність дорослої людини більша, ніж дитини.

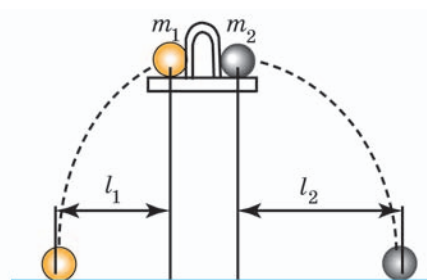
Для характеристики інертності тіл ввели особливу величину — масу тіла, яку прийнято позначати літерою m .

Щоб мати можливість порівнювати маси різних тіл, масу якогось з них треба прийняти за одиницю. Вибір одиниці маси може бути довільний, проте одиниця маси повинна бути зручна для її практичного застосування.

Спочатку за одиницю маси брали масу 1 дм^3 дистильованої води. Але цей еталон не забезпечував необхідної точності. Тому в СІ за одиницю маси брали масу спеціального еталону, виготовленого з твердого сплаву платини і іридію, що не окислюється на повітрі. Ця одиниця маси отримала назву **кілограм** — **1 кг**.

Маючи еталон одиниці маси, можна порівнювати з ним маси інших тіл. Існує кілька способів порівняння мас.

Розглянемо один з них. Покладемо на горизонтальну пластину, підняту над підлогою, кульку для гри в настільний теніс і таку ж кульку, але наповнену піском. Між кульками поставимо зігнуту за допомогою нитки металеву лінійку (мал. 78).



Мал. 78

Нехай маса однієї з кульок нам відома, позначимо її m_1 , масу другої кульки — m_2 . Перепалимо нитку. Розпрямляючись, лінійка штовхає кульки в горизонтальному напрямі, і вони одночасно падають на підлогу. Відстані, пройдені кульками в горизонтальному напрямі, різні: кулька, наповнена піском, пролетіла меншу відстань, ніж порожниста. Дослід показує, що внаслідок взаємодії з лінійкою порожниста кулька рухалася з більшим прискоренням і набула більшої швидкості, ніж кулька, наповнена піском. Отже, її інертність менша.

Досліди, аналогічні виконаному, доводять те, що при відсутності сил тертя завжди внаслідок взаємодії відстані, пройдені тілами, обернено пропорційні до мас взаємодіючих тіл:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (2.3)$$

Якщо маса одного тіла (наприклад, m_1) відома, то можна визначити масу другого тіла:

$$m_2 = m_1 \frac{l_1}{l_2}. \quad (2.4)$$

Таким чином, знаючи масу одного з тіл, можна визначити масу іншого.

Ми розглянули тільки один із способів порівняння мас. Існують інші способи. З одним із них ви ознайомитеся пізніше.

Можна взяти три однакові кулі масою m кожна і, з'єднавши дві з них, створити попередній дослід. Одинокa куля впаде на відстані l , а дві з'єднані кулі на відстані в 2 рази меншій. Отже, маса з'єднаних куль буде дорівнювати $2m$.

Якщо система утворилася з N тіл, маси яких відповідно $m_1, m_2, m_3, \dots, m_N$, то її маса дорівнює сумі мас цих тіл:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N. \quad (2.5)$$

Цю властивість маси називають **адитивністю** (з латинської *aditivus* — отримуваний шляхом додавання).

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Веслувальники намагаються заставити човен рухатися проти течії, але не можуть цього зробити, і човен залишається у спокої відносно берега. Дії яких тіл при цьому компенсуються?
2. У чому полягає перший закон Ньютона (закон інерції)?
3. Скажіть, за яких умов тіло може рухатися прямолінійно і рівномірно.
4. У чому виявляється інертність тіл?
5. Що таке маса тіла? Як її можна визначити?
6. У чому полягає властивість адитивності маси?

§ 19 ІНЕРЦІАЛЬНА СИСТЕМА ВІДЛІКУ. МЕХАНІЧНИЙ ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ГАЛІЛЕЯ

У першому законі Ньютона мова йшла про рівномірний прямолінійний рух. Рух можна розглядати тільки в певній системі відліку. Виникають запитання: в якій же системі відліку виконується перший закон. Чи можна

вважати, що він виконується у будь-якій системі відліку. Навіть наближений аналіз механічних явищ показує, що закон інерції виконується далеко не в усіх системах відліку.

Розглянемо простий дослід: покладемо м'яч на горизонтальний столик у вагоні і спостерігатимемо за рухом м'яча. Якщо поїзд знаходиться в стані спокою відносно Землі, то і м'яч зберігає стан спокою до тих пір, поки ми не подіємо на нього іншим тілом (наприклад, рукою). Отже, в системі відліку, пов'язаній із Землею, закон інерції виконується.

Нехай тепер поїзд рухається відносно Землі рівномірно і прямолінійно. У цьому випадку в системі відліку, пов'язаній з поїздом, м'яч зберігає стан спокою, а в системі відліку, пов'язаній із Землею, — рівномірного і прямолінійного руху.

Отже, закон інерції виконується не тільки в системі відліку, пов'язаній із Землею, а й в усіх системах відліку, які рухаються відносно Землі рівномірно і прямолінійно.

Уявімо собі, що потяг швидко збільшує свою швидкість або, навпаки, різко гальмує, або круто повертає (в усіх цих випадках він рухається з прискоренням відносно Землі). Тоді відносно Землі м'яч, як і раніше, зберігає рівномірний і прямолінійний рух, який він мав до початку прискорення потяга. Але відносно потяга м'яч «сам собою» виходить із стану спокою, хоча і немає тіл, які б виводили його з цього стану.

Отже, в системі відліку, пов'язаній з прискореним рухом потяга, відносно Землі, закон інерції порушується.

Системи відліку, в яких виконується закон інерції, отримали назву інерціальних. Системи відліку, в яких закон інерції не виконується, називаються неінерціальними.

Перший закон Ньютона дає змогу визначити, чи є система відліку інерціальною. Для цього потрібно вибрати тіло, для якого сили, що діють на нього, зрівноважені, і простежити за тим, як рухається це тіло відносно системи відліку, що цікавить нас. Якщо рух рівномірний і прямолінійний (в окремому випадку — це спокій), то система інерціальна; якщо рух нерівномірний — система неінерціальна.

З усіх систем відліку найбільш важливою для нас на практиці є система відліку, пов'язана із Землею. Вище ми з'ясували, що в цій системі завжди виконується закон інерції. Проте це твердження ґрунтувалося на грубо поставлених дослідах, наприклад вивчення дій покладеного на горизонтальний стіл м'яча. Більш точні досліди переконують у протилежному.

Розглянемо один з таких дослідів — так званий дослід Фуко. Він полягає в спостереженні за площиною гойдання математичного маятника. Для того, щоб коливання можна було спостерігати протягом достить великого інтервалу часу, Фуко (1850) використав маятник довжиною 67 м і масою вантажу 28 кг (мал. 79). (На сьогодні цей дослід можуть бачити всі охочі в Ісаакіївському соборі м. Санкт-Петербург. Довжина маятника становить 98 м, маса вантажу — 600 кг.) Сили пружності і тяжіння, що діють на вантаж маятника, перебувають весь час у площині його гойдання і, отже, вивести його з цієї площини не можуть. Оскільки вздовж осі, перпендикулярної до площини гойдання, на маятник не діє жодне тіло, то вздовж цієї осі маятник за інерцією повинен зберігати стан спокою. Проте дослід Фуко показав, що площина гойдання маятника поступово повер-



Мал. 79

тається відносно Землі. Таким чином, закон інерції вздовж осі, перпендикулярної до площини гойдання, не виконується.

Виявилось, що площина гойдання маятника Фуко зберігає практично незмінне положення в системі відліку, пов'язаній з центром Сонця, осі координат якої напрямлені на віддалені зірки (ця система відліку не обертається разом із Сонцем).

Проте відхилення від закону інерції у системі відліку, пов'язаній із Землею, невеликі, і в першому наближенні її можна вважати інерціальною.

Виникає запитання: *чи існують строго інерціальні системи*. Ньютон, формулюючи закон інерції і включаючи його до основних законів динаміки, стверджував тим самим, що такі системи відліку в природі існують. Насправді, якщо в природі існує закон інерції, то повинна існувати і така система відліку, де він виконується абсолютно строго, тобто інерціальна система відліку. А якщо існує хоча б одна така система, то з цього випливає, що їх є незліченна множина, тому що будь-яка система відліку, що рухається відносно інерціальної рівномірно і прямолінійно, буде також інерціальною.

Отже, можна сказати, що перший закон Ньютона строго виконується лише в інерціальних системах, пов'язаних із Сонцем; приблизно — в системі відліку, пов'язаній із Землею.

Закон інерції має дуже глибокий фізичний зміст. З нього випливають уявлення про те, які повинні бути властивості простору, щоб рух тіл у ньому підпорядковувався законам механіки Ньютона. Оскільки закон в інерціальних системах виконується незалежно від напрямку, то властивості простору в цих системах відліку повинні бути однаковими в усіх напрямках. Іншими словами, в механіці Ньютона простір є ізотропним (ізотропність — однаковість властивостей в усіх напрямках). Далі із закону інерції випливає, що простір повинен бути також і однорідним, тобто в ньому не може існувати яких-небудь точок, які б виділялися відносно інших. Насправді, при русі тіла за інерцією його швидкість не змінюється від того, що воно переходить з однієї точки простору в іншу. Отже, у цих

точок немає яких-небудь особливих властивостей, які б могли викликати зміну швидкості руху тіла; всі точки простору рівноправні.

У давнину простір вважали неоднорідним, окремі його точки наділяли особливими властивостями. Найбільш особливі властивості приписували центру Землі, вважаючи його абсолютно нерухомою точкою, до якої, нібито, «прагнуть» всі важкі тіла («центр Всесвіту»). Цілком зрозуміло, що і система відліку, пов'язана з центром Землі, вважалася «привілейованою» і абсолютно нерухомою. Пізніше розвиток астрономії і механіки привів до остаточного затвердження однорідності й ізотропності простору і доведення руху Землі, Сонця та інших небесних тіл. Система відліку, пов'язана із Землею, втратила свою «винятковість». Те саме можна сказати про системи, пов'язані з Сонцем та іншими небесними тілами.

Проте запитання: *чи не існує все-таки в природі яка-небудь абсолютно нерухома система відліку*, залишалася відкритим.

Ньютон вважав, що абсолютно нерухомим є «порожній» простір, який, згідно з його уявленнями, існує незалежно від матерії, — на зразок гігантського «порожнього ящика». Через однорідність і ізотропність такого простору розміщена у ньому матеріальна точка нескінченно довго рухалася б у будь-якому напрямі рівномірно і прямолінійно, підкоряючись закону інерції. Отже, система відліку, пов'язана з порожнім простором, була б строго інерціальною.

Але розвиток фізики показав, що простір не існує окремо від матерії. Простір — це тільки форма існування матеріальних тіл, а не якийсь окремий «порожній ящик».

Тому ніякої системи відліку, пов'язаної з «порожнім» простором, не існує. Систему відліку можна пов'язати тільки з матеріальними тілами.

Оскільки всі матеріальні тіла у Всесвіті безперервно рухаються одне відносно одного, то у природі не існує жодної абсолютно нерухомої системи відліку.

Проте закон інерції стверджує наявність інерціальних систем відліку. Виникає запитання: *чи однаково протікають фізичні явища у різних інерціальних системах*.

Першим це запитання поставив Галілей. У своїй книзі «Діалог про дві найголовніші системи світу — птоломееву і копернікову» він відповів на нього так: «Розмістіть себе із своїм знайомим у залі під палубою будь-якого великого корабля і пустіть туди мух, метеликів та інших подібних маленьких комах, що літають; нехай там також буде велика посудина з водою, в якій плавають рибки; там же до стелі підвісьте кухоль, з якого краплина за краплиною витікала б вода в іншу посудину, що знаходиться внизу під ним. Поки корабель стоїть на місці, спостерігайте, як комахи з рівною швидкістю літатимуть у різні боки; краплини, що падають, потраплятимуть у підставлену посудину; і ви, кидаючи знайомому яку-небудь річ, не будете вимушені кидати її з більшою силою в один бік, ніж в інший, якщо тільки відстані однакові; і, стрибаючи, ви будете віддалятися у різні боки на однакову відстань. Відмітьте все це якомога уважніше (хоча немає ніякого сумніву, що так і повинно бути, доки судно стоїть) і змусьте привести у рух корабель з якою завгодно швидкістю. І тоді ви не зафіксуєте і щонайменшої зміни в усіх названих явищах і ні за одним з них не в змозі будете судити, рухається корабель чи стоїть на місці; ви, стрибаючи, про-

ходитимете по підлозі ті самі відстані, що і під час спокою корабля, тобто ви не зробите, оскільки корабель рухається дуже швидко, більших стрибків до корми, ніж до носа корабля, хоча у той час, коли ви знаходитеся у повітрі, підлога, що під вами, рухається у бік, протилежний вашому стрибку, і, кидаючи будь-яку річ знайомому, вам не потрібно буде кидати її з більшою силою, якщо він буде біля носа корабля, а ви біля корми, ніж якби ви стояли навпаки; краплини з підвішеного до стелі кухля з водою падатимуть вертикально на підлогу і жодна не впаде у напрямку до корми, хоча, доки крапля знаходиться в повітрі, корабель переміщується вперед... Комахи продовжуватимуть свої польоти на всі боки, і вони не зберуться (неначе втомившись слідувати за швидким ходом корабля) на тому боці корабля, що ближче до корми».

Таким чином, Галілей із спостережень зробив висновок, що рівномірний і прямолінійний рух корабля не впливає на механічні явища, що відбуваються в приміщенні під палубою.

У всіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково за однакових початкових умов.

Це твердження називається механічним принципом відносності Галілея. Принцип відносності був сформульований Галілеєм тільки для механічних явищ. Це стає цілком зрозумілим, якщо пригадати, що за часів Галілея найбільш розвиненим розділом фізики була механіка. У той час люди ще не знали про існування електромагнітних явищ. Пізніше механічний принцип відносності було узагальнено Ейнштейном на всі фізичні явища.

В принципі відносності мова йде про початкові умови, оскільки характер руху значною мірою залежить від цих умов. Наприклад, якщо тіло просто відпустити, то воно буде рухатися вздовж вертикалі, а якщо його при цьому штовхнути горизонтально, тобто змінити початкові умови, то воно почне рухатися по параболі.

Оскільки в усіх інерціальних системах всі механічні явища протікають однаково, то виявити рівномірний і прямолінійний рух за механічними дослідженнями, що виконуються в будь-якій із цих систем, неможливо. Таким чином, ми прийшли до висновку, що **ніякими механічними дослідженнями і спостереженнями, проведеними всередині інерціальної системи, не можна виявити, чи знаходиться система в стані спокою або рівномірного прямолінійного руху.**

Наша Земля рухається навколо Сонця зі швидкістю приблизно 30 м/с. Оскільки радіус орбіти дуже великий, то її кривизна незначна, і в першому наближенні ми можемо вважати, що Земля рухається рівномірно і прямолінійно. Проте ми цього руху не помічаємо. Це відбувається тому, що виявити рух Землі за механічними явищами, що протікають на Землі, не можна (якщо, звичайно, не вдаватися до спеціально поставлених дуже точних дослідів). Земля вважалася нерухомою.

Оскільки фізичні явища підкоряються певним фізичним законам, то подібність протікання явищ у різних інерціальних системах відліку означає, що і відповідні закони фізики в цих системах однакові.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які системи відліку називають інерціальними? Неінерціальними?
2. Якими дослідами можна довести інерціальність або неінерціальність системи відліку?
3. Маємо одну інерціальну систему відліку. Як за рухом іншої системи відліку встановити, інерціальна вона чи ні?
4. Чи можна на досліді всередині інерціальної системи відліку визначити її власний рух?
5. У чому полягає принцип відносності Галілея? Якими дослідами його можна перевірити? Чим визначається значення цього принципу для науки?
6. Охарактеризуйте за загальним планом фізичне поняття «інерціальна система відліку».

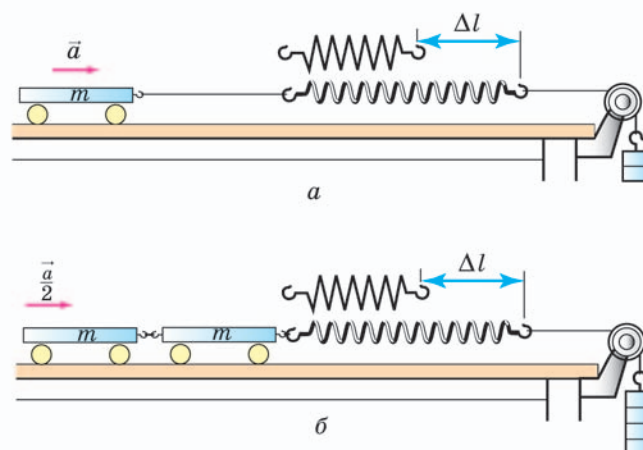
§ 20 ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Щоб з'ясувати зв'язок між силою, що діє на тіло, і прискоренням руху тіла, слід виконати дослід. У цьому досліді одна і та сама сила повинна надавати прискорення різним тілам, тобто тілам різної маси, причому прискорення цих тіл можуть бути виміряні.

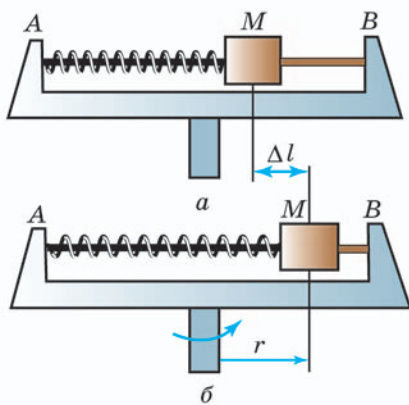
Для проведення досліду вибираємо тіло, яке діє на всі інші тіла з однаковою силою. Таким тілом може слугувати розтягнута або стиснута пружина, в якій виникає сила пружності. Від усіх інших сил сила пружності відрізняється певною особливістю, вона залежить тільки від того, наскільки розтягнута або стиснута пружина, але не залежить від того, до якого тіла пружина прикріплена. Тому на будь-яке тіло, прикріплене до пружини, розтягнутої на певну довжину, діє одна і та сама сила — сила пружності пружини.

Оскільки сила одна і та сама, то якась величина повинна бути однаковою для всіх тіл, що прискорюються цією силою. На досліді й слід з'ясувати, що це за величина.

Проведемо такий, на перший погляд простий, дослід. До візка відомої маси m прикріпимо один кінець пружини, а інший її кінець прикріпимо до



Мал. 80



Мал. 81

нитки з важками, перекинутаї через блок (мал. 80, а). Внаслідок притягання до Землі важки будуть рухатися вниз і розтягувати пружину. Пружина, розтягнута на певну довжину Δl , діє силою пружності на візок і надає йому прискорення. Це прискорення можна виміряти, наприклад, воно дорівнює a .

Повторимо дослід, але не з одним, а з двома однаковими візками, з'єднаними разом (мал. 80, б) так, що їх маса буде дорівнювати $2m$. Нам треба виміряти прискорення візків при такому самому видовженні пружини, оскільки сила повинна бути незмінною. Щоб видовження

пружини було таким, як у першому досліді, до нитки потрібно підвісити інший важок. Дослід показує, що при тому самому видовженні пружини Δl прискорення двох візків дорівнюватиме $\frac{a}{2}$. Якщо з'єднати три, чотири і

більше візків, то при тому самому видовженні Δl пружини прискорення тіл буде в три, чотири і більше разів менше, ніж одного візка. Виявляється, що при збільшенні маси візка у певне число разів прискорення, що його набуває тіло під дією тієї самої сили, зменшується у стільки ж разів. А це означає, що добуток маси візка і його прискорення буде однаковим.

Проведемо інший, простіший, дослід. Будемо тілам різної маси надавати доцентрові прискорення. Для цього скористаємося відцентровою машиною.

Помістимо алюмінієвий циліндр M з просвердленим вздовж його осі отвором на стержень відцентрової машини (мал. 81, а). Прикріпимо до циліндра один кінець пружини, а інший її кінець закріпимо на корпусі машини в точці А. Почнемо обертати машину, циліндр M починає ковзати по стержню, віддаляючись від точки А і розтягуючи тим самим пружину.

Якби не було пружини, циліндр дійшов би до точки В. Але внаслідок дії сили пружності розтягнутої пружини циліндр, віддалившись від осі обертання (на відстань Δl), почне рухатися по колу радіусом r (мал. 81, б). Доцентрове прискорення циліндра M напрямлене до центра. Вздовж радіуса напрямлена і вісь пружини. Отже, прискорення циліндра M напрямлене вздовж осі пружини, вздовж якої діє і сила пружності. Зрозуміло, що саме ця сила надає тілу доцентрового прискорення.

Доцентрове прискорення a за модулем дорівнює

$$a = 4\pi^2 n^2 r, \quad (2.6)$$

де n — частота обертання; r — радіус кола, по якому рухається тіло. Вимірявши n і r , визначимо прискорення a .

Замінімо алюмінієвий циліндр таким самим за розмірами сталевим циліндром. Ми вже знаємо, що його маса в три рази більша за масу алюмінієвого циліндра. Будемо знову обертати машину і підберемо таке число обертів, щоб розтягування пружини було таким самим, як і в першому досліді. Тоді і сила, що діє на сталевий циліндр, буде такою самою.

З дослідів ми дізнаємося, що прискорення сталевого циліндра в три рази менше, ніж алюмінієвого.

Досліди, описані вище, можна провести з безліччю інших тіл різної маси. І знову, як і в досліді з візками, ми побачимо, що прискорення різних тіл будуть різними, але добуток маси тіла і його прискорення для всіх тіл буде одним і тим же. Таким чином, з дослідів ми дійшли висновку: якщо на різні тіла діє одна і та сама сила, то і величина, що дорівнює добутку маси тіла і його прискорення, залишається сталою.

Це дало І. Ньютону підставу стверджувати, що сила дорівнює добутку маси тіла і його прискорення, і сформулювати найважливіший закон механіки, який був названий **другим законом Ньютона**.

Сила, що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла і його прискорення, що надане цією силою.

Якщо позначити силу літерою F , то математично другий закон Ньютона буде виражатися формулою $F = ma$. Цю формулу відносять до модуля сили. Проте оскільки прискорення — величина векторна, а маса — скалярна, то і сила — векторна величина. Тому формулу, що виражає другий закон Ньютона, слід записувати у такому вигляді:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.7)$$

З даної формули можна отримати вираз для прискорення:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad (2.8)$$

з якого видно, що прискорення тіла завжди напрямлене так само, як і сила, що викликає його.

Прискорення матеріальної точки прямо пропорційне прикладеній до неї силі, обернено пропорційне до маси цієї точки і напрямлене у бік дії сили.

Слід зауважити, що другий закон Ньютона, як і перший, виконується лише для матеріальних точок. У разі дії сил на довгасте тіло другий закон описує прискорення не всього тіла, а тільки його центра мас (центра тяжіння). Проте при поступальному русі твердого тіла всі його точки мають однакові прискорення, тому другий закон виконується для будь-якої його точки.

Тільки при вільному падінні на тіло діє одна сила, а в усіх інших випадках на тіло завжди діє кілька сил. Але оскільки під рівнодійною ми розуміємо таку силу, яка за своєю дією замінює всі інші сили, що діють на дане тіло, то другий закон Ньютона буде справедливий і для рівнодійної. Рівнодійна знаходиться геометричним додаванням, а тому математичний вираз другого закону можна записати так:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}. \quad (2.9)$$

Обидва вирази другого закону визначають прискорення, але ці прискорення мають різний зміст. У першому виразі мова йде про прискорення, викликане однією певною силою, а в другому — сумою сил.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Сформулюйте другий закон Ньютона.
2. Що можна сказати про напрям сили і прискорення, яке вона надає тілу?

3. Як можна виміряти силу, спираючись на другий закон Ньютона?
4. Чи можна, виходячи з формули $F = ma$, стверджувати, що сила F , прикладена до тіла, залежить від маси тіла m і від його прискорення a ?
5. Чи можна на підставі формули $a = \frac{F}{m}$ сказати, що прискорення тіла залежить від прикладеної до нього сили і від його маси?
6. Використовуючи другий закон Ньютона, сформулюйте перший закон Ньютона.

§ 21 ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ НЬЮТОНА

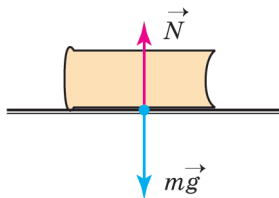
Кожен із законів Ньютона поступово розкриває зміст одного з найважливіших понять механіки — поняття сили. Якщо другий закон стверджує, що кожна сила викликає прискорення, то третій закон говорить, що всі сили носять характер взаємодій.

Сили, з якими які-небудь два тіла діють одне на одне, завжди рівні за значенням, але протилежні за напрямом.

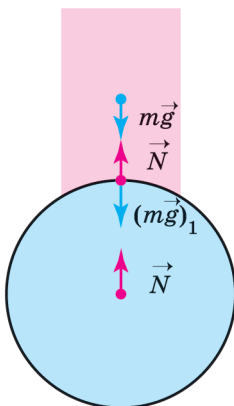
Наприклад, на столі лежить книга (мал. 82). З якою вона діє на стіл $\vec{F} = m\vec{g}$, з такою ж за значенням силою стіл діє на книгу \vec{N} . Математично це записують так:

$$\vec{F} = -\vec{N}. \quad (2.10)$$

Знак «мінус» означає протилежність напрямів цих сил.



Мал. 82



Мал. 83

Третій закон Ньютона справедливий не тільки для нерухомих, а й для рухомих тіл.

Проте рівність сил не завжди обумовлена третім законом. Слід розрізняти сили взаємодії, прикладені до різних взаємодіючих тіл, і так звані рівнодійні сили, що діють на одне тіло. Сили взаємодії підпорядковуються третьому закону Ньютона, а сили, що діють на одне тіло, підпорядковуються другому закону. Щоб розібратися в цьому докладніше, розглянемо наступний приклад.

На поверхні Землі лежить тіло (мал. 83). На це тіло діє сила $m\vec{g}$, з якою його притягує Земля. Проте згідно з третім законом і тіло притягує до себе Землю з такою самою за значенням, але протилежно напрямленою силою $(m\vec{g})_1$. Таким чином, $m\vec{g} = -(m\vec{g})_1$ згідно з третім законом.

Окрім гравітаційної взаємодії Землі і тіла, між ними існує ще й пружна: з якою силою тіло діє на Землю, з такою самою силою і Земля діє на тіло, тобто $\vec{N} = \vec{N}_1$ згідно з третім законом Ньютона.

Таким чином, на тіло діють дві сили: $m\vec{g}$ і \vec{N} . Для цих сил, оскільки вони прикладені до одного тіла, можна записати другий закон Ньютона:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}. \quad (2.11)$$

Тіло знаходиться у спокої, тобто $\vec{a} = 0$. Тому $m\vec{g} = -\vec{N}$. Ця рівність сил доведена на основі другого закону.

На Землю також діють дві сили: \vec{N}_1 і $(m\vec{g})_1$. Вони зрівноважені, тобто

$$\vec{N}_1 = -(m\vec{g})_1. \quad (2.12)$$

Ця рівність так само є наслідком застосування другого закону.

Не слід вважати, що закони Ньютона виконуються в усіх випадках руху. Ми вже говорили про те, що перший закон Ньютона виконується тільки в інерціальних системах відліку. Другий закон виконується лише в інерціальних системах. Третій закон виконується і в неінерціальних системах, але не завжди. (Він не виконується для так званих сил інерції.) Таким чином, першим обмеженням законів Ньютона є те, що вони виконуються тільки в інерціальних системах відліку.

Механіка Ньютона є механікою малих швидкостей (порівняно зі швидкістю поширення світла).

Виявилось, що рух у мікросвіті, тобто у світі молекул, атомів і елементарних частинок, підпорядковується іншим законам. Тому механіка Ньютона незастосовна до мікросвіту, вона є механікою великих тіл (звичайно, порівняно з розмірами молекул).

Таким чином, класична механіка Галілея—Ньютона виконується лише в інерціальних системах, для великих тіл, які рухаються з малими швидкостями, а тому вважати її універсальною не можна. Це необхідно пам'ятати під час розв'язання практичних задач.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Сформулюйте третій закон Ньютона.
2. Напишіть формулу третього закону Ньютона.
3. Якими дослідами можна перевірити цей закон?
4. Що можна сказати про природу сил, які виникають під час взаємодії тіл?
5. Як напрямлені прискорення, що їх отримують тіла при взаємодії?
6. Які межі застосування законів Ньютона?

Задачи та вправи

Дві основні задачі динаміки. Другий закон Ньютона є загальним законом механічного руху тіл. Він пов'язує прискорення тіла даної маси з прикладеними до нього силами. Він дозволяє розв'язати дві основні задачі динаміки: 1) за силами, що діють на тіло, визначити кінематичні характеристики його руху; 2) за кінематичними характеристиками руху тіла визначити сили, що діють на нього.

Обидві задачі динаміки мають багато спільного у розв'язанні. Рух відбувається внаслідок взаємодії даного тіла з іншими тілами. Ці взаємодії можна характеризувати силами. Додаючи геометрично ці сили, використовуючи другий закон динаміки, ми можемо визначити прискорення руху тіла. Тому під час розв'язання задач динаміки перш за все треба вказати

всі сили, які діють на дане тіло. При цьому слід зображати сили графічно правильно, точно вказувати їх точки прикладання і напрям, оскільки від точки прикладання і напрямку сили залежить характер руху. Всі задачі з динаміки можна розв'язувати, використовуючи такий алгоритм.

1. Аналіз задачі. Короткий запис умови задачі.
2. Виконання малюнка з позначенням всіх сил, що діють на дане тіло.
3. Запис другого закону Ньютона у векторній формі.
4. Вибір координатних осей.
5. Запис другого закону Ньютона в проекціях на координатні осі.
6. Подальші обчислення для визначення шуканих величин у даній задачі.
7. Аналіз розв'язку задачі.

Як приклад розглянемо розв'язання задач.

Розв'язуємо разом

1. Тіло рухається вниз похилою площиною, кут нахилу якої 45° . Коефіцієнт тертя 0,4. Визначити прискорення руху тіла.

Дано:

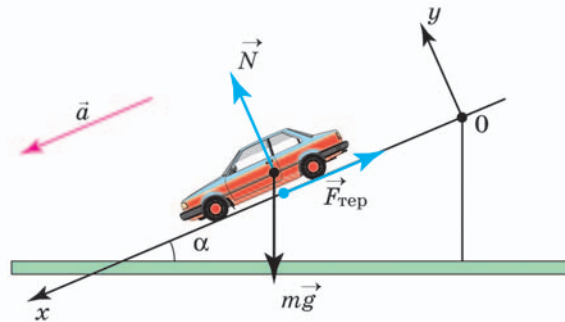
$\alpha = 45^\circ$
 $\mu = 0,4$

$a = ?$

Розв'язання

На дане тіло діє Земля, яка притягає його з силою $m\vec{g}$, що прикладена до центра тіла і напрямлена вертикально вниз. Крім того, на тіло діє похила площина з силою \vec{N} , що прикладена до дотичної до поверхні тіла і напрямлена перпендикулярно до нижньої поверхні тіла. На тіло діє також сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$, що напрямлена протилежно руху тіла.

Після аналізу і запису умови задачі виконаємо малюнок.



Запишемо другий закон Ньютона у векторній формі:

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

У даному випадку координатні осі найзручніше напрямити вздовж похилої площини і перпендикулярно до неї. У цьому випадку переміщення вздовж осі Oy під час руху не буде, а отже, прискорення a_y дорівнюватиме нулю.

Запишемо другий закон Ньютона в проекціях на координатні осі.

Проекція сили \vec{N} на вісь Ox дорівнює нулю. Проекція сили $\vec{F}_{\text{тер}}$ буде дорівнювати її значенню, але матиме від'ємний знак, оскільки напрям-

лена протилежно напрямку осі Ox . Проекція сили $m\vec{g}$ на вісь Ox матиме вигляд $mg\sin\alpha$. Знак проекції сили $m\vec{g}$ буде додатним, оскільки вона напрямлена за напрямом осі Ox . У проекціях на вісь Ox другий закон Ньютона матиме вигляд

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

Проекція сили $\vec{F}_{\text{тер}}$ на вісь Oy буде дорівнювати нулю. Проекція сили \vec{N} дорівнюватиме її значенню і матиме знак «плюс». Проекція сили $m\vec{g}$ матиме вигляд $mg\cos\alpha$ і знак «мінус». Оскільки $a_y = 0$, то другий закон Ньютона в проекції на вісь Oy запишеться таким чином:

$$-mg\cos\alpha + N = 0.$$

Ці два рівняння містять у собі невідомі: m , a , N , $F_{\text{тер}}$. Для розв'язання задачі необхідно записати ще рівняння з тими ж невідомими, щоб число рівнянь дорівнювало числу невідомих. Тому для розв'язання досить записати вираз

$$F_{\text{тер}} = \mu N = \mu mg.$$

Врахувавши всі вирази, отримаємо рівняння

$$ma = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha.$$

Скоротивши на m , запишемо

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha).$$

Підставивши значення, визначимо прискорення руху тіла:

$$a = 9,8 \text{ м/с}^2 (0,707 - 0,4 \cdot 0,707) = 4,16 \text{ м/с}^2.$$

Таким чином, ми бачимо, що тіло рухається вниз похилою площиною з прискоренням $4,16 \text{ м/с}^2$.

В і д п о в і д ь: $a = 4,16 \text{ м/с}^2$.

2. Два тіла масою m_1 і m_2 , що зв'язані ниткою, лежать на горизонтальній гладенькій поверхні стола. З яким прискоренням рухатиметься тіло, якщо до тягарця m_1 прикласти силу 1 Н , напрямлену паралельно площині стола? Чому дорівнює натяг нитки, якою зв'язані тіла? Маса тіл $m_1 = 0,2 \text{ кг}$, $m_2 = 0,3 \text{ кг}$.

Дано:

$$m_1 = 0,2 \text{ кг}$$

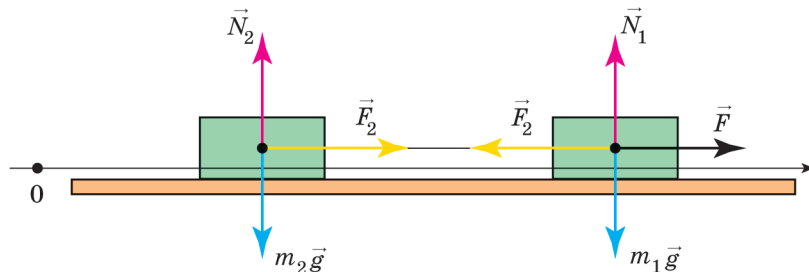
$$m_2 = 0,3 \text{ кг}$$

$$F = 1 \text{ Н}$$

$$a = ?$$

$$F_1 = ?$$

Р о з в ' я з а н н я
Які сили діють на тіла, видно з малюнка.



Рівняння другого закону динаміки запишемо так:

$$m_2\vec{a} = \vec{F}_2 + \vec{N}_2 + m_2\vec{g} \text{ і } m_1\vec{a} = \vec{F} + m_1\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{F}'_2.$$

Напрямимо вісь координат горизонтально за напрямом дії сили і запишемо рівняння руху тіл у проекції на цю вісь:

$$m_2 a = F_2 \text{ і } m_1 a = F - F'_2.$$

Проте за третім законом Ньютона, $F_2 = F'_2$, тоді $m_1 a = F - m_2 a$, звідки

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2}; \quad a = \frac{1 \text{ Н}}{0,2 \text{ кг} + 0,3 \text{ кг}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Підставивши a в рівняння для другого тіла, отримаємо

$$F_2 = m_2 a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} F; \quad F_2 = \frac{0,3 \text{ кг} \cdot 1 \text{ Н}}{0,2 \text{ кг} + 0,3 \text{ кг}} = 0,6 \text{ Н}.$$

В і д п о в і д ь: $a = 2 \text{ м/с}^2$; $F_2 = 0,6 \text{ Н}$.

3. Пасажирський потяг масою 400 т рухається зі швидкістю 40 км/год. Визначити силу гальмування, якщо гальмівний шлях потяга 200 м.

Дано:

$$m = 400 \text{ т} = 4 \cdot 10^5 \text{ кг}$$

$$v_0 = 40 \text{ км/год} = 11 \text{ м/с}$$

$$l = 200 \text{ м}$$

$F = ?$

Р о з в' я з а н н я

Гальмівна сила діє на всій ділянці, на якій відбувається гальмування, і сповільнює рух потяга. Значення цієї сили визначається за другим законом Ньютона: $F = ma$.

З рівняння рівносповільненого руху: $v^2 - v_0^2 = 2al$. При $v = 0$ визначимо прискорення $a = -\frac{v_0^2}{2l}$. Тоді $F = -m \frac{v_0^2}{2l}$.

Знак «мінус» вказує на те, що гальмівна сила напрямлена у бік, протилежний рухові потяга.

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[F] = \text{кг} \frac{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{\text{м}} = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Підставляючи числові значення, маємо

$$F = -4 \cdot 10^5 \text{ кг} \frac{121 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 200 \text{ м}} = -121\,000 \text{ Н} = -121 \text{ кН}.$$

В і д п о в і д ь: $F = -121 \text{ кН}$.

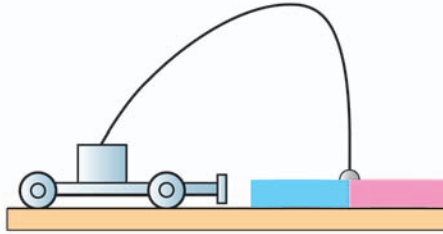
Рівень А

90. Яке з двох тіл отримує більше прискорення при однаковій дії на них: ящик масою 25 кг чи гиря масою 5 кг?
91. Автомобіль із вимкненим двигуном проїхав до повної зупинки по рівній горизонтальній дорозі ще якийсь час. Чи можна стверджувати, що весь час він рухався за інерцією?

92. Тіло рухається зі сталою швидкістю під дією кількох сил. Чи можна цей стан тіла розглядати як рух за інерцією?
93. Людина, впираючись руками у стіну вагона, хоче зрушити його з місця. Проте вагон зберігає стан спокою. Поясніть чому.
94. З човна масою 0,5 т вибирають канат, поданий на баркас. Шляхи, що їх пройшли до зустрічі човен і баркас, дорівнюють відповідно 8 і 2 м. Яку масу має баркас?
95. Парашутист спускається, рухаючись прямолінійно і рівномірно. Поясніть, дії яких сил компенсуються.
96. Як установиться поверхня бензину в цистерні під час рівномірного, прискореного й сповільненого руху потяга?
97. Сила 200 Н діє на тіло масою 5 кг. Визначте прискорення, з яким рухається тіло.
98. Визначте масу тіла, якому сила 5000 Н надає прискорення $0,2 \text{ м/с}^2$.
99. З яким прискоренням рухається тіло масою 300 кг, якщо на нього діє сила 1500 Н?
100. Визначте масу тіла, якому сила 500 Н надає прискорення $0,2 \text{ м/с}^2$. Чому дорівнює переміщення тіла за 30 с руху із стану спокою?
101. Під дією сили 2,5 кН швидкість автомобіля масою 5 т зросла з 54 км/год до 72 км/год. Визначте прискорення, з яким рухався автомобіль, і час розгону.
102. Протягом 30 с людина жердиною відштовхує від пристані баржу, прикладаючи зусилля 400 Н. На яку відстань від пристані відпливе баржа, якщо її маса 300 т?
103. На два тіла діють рівні сили. Перше тіло має масу 50 г і рухається з прискоренням 1 м/с^2 . Друге тіло рухається з прискоренням 1 см/с^2 . Яка маса другого тіла?
104. Сила тяги, що діє на автомобіль, дорівнює 1 кН, а опір рухові – 0,5 кН. Чи не суперечить це третьому закону Ньютона?
105. Барон Мюнхгаузен переконував, що сам себе витягнув за чуба з болота. Чому це неможливо?
106. Лінкор, зіткнувшись із маленьким пароплавом, може потопити його і майже не отримати при цьому пошкоджень. Чи не суперечить це третьому закону Ньютона?
107. Двоє хлопчиків тягнуть пружини динамометра у протилежні боки. Що покаже динамометр, якщо перший хлопчик може розвинути силу 300 Н, а другий – 200 Н?

Рівень В

108. Візок, рухаючись зі стану спокою під дією сили, пройшов шлях 40 см за деякий час. Коли на візок поклали тягарець масою 20 г, то під дією тієї самої сили він за той самий час пройшов шлях 20 см. Яка маса візка?
109. Чи можна твердити, що інерція одного з двох неоднакових тіл більша або менша? Відповідь поясніть.
110. Інертність тіла і маса тіла: що з них — фізична величина, а що — властивість матерії?



Мал. 84

111. Стоячи у вагоні потяга, що рухається рівномірно, ви підстрибнули. Чи опуститеся ви на те саме місце, звідки підстрибнули, відносно вагона? Відносно залізничного полотна? Яка з цих двох систем відліку є інерціальною? Чи є інерціальною системою карусель, штучний супутник Землі?
112. Порівняйте прискорення двох куль однакового радіусу під час взаємодії, якщо першу кулю зроблено зі сталі, а другу – зі свинцю.
113. Електричне поле надає електрону прискорення 2000 км/с^2 . Яке прискорення це поле буде надавати протону, якщо відомо, що маса протона приблизно в дві тисячі разів більша за масу електрона?
114. Сила F надає тілу масою m_1 прискорення 2 м/с^2 , а тілу масою m_2 – прискорення 3 м/с^2 . Якого прискорення під дією тієї самої сили набудуть обидва тіла, коли їх з'єднати одне з одним?
115. На тіло масою 1 кг подіяла сила 10 Н . Через який час модуль прискорення тіла буде 10 м/с^2 ? Яке за значенням буде прискорення у той момент, коли сила тільки що почала діяти на тіло? Відповідь обґрунтуйте.
116. Під дією якої сталої сили тіло масою 300 г , що знаходилось у стані спокою, протягом 5 с пройде шлях 25 м ?
117. Пасажирський потяг масою 400 т рухається зі швидкістю 40 км/год . Визначте силу гальмування, якщо гальмівний шлях потяга 200 м .
118. Наведено дані, одержані при вивченні залежності прискорення тіла від сили, що діє на тіло при незмінній масі:

$F, \text{ кН}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$a, \text{ м/с}^2$	0,16	0,3	0,44	0,6	0,75	0,9

- Побудуйте графік; зробіть висновок про досліджувану залежність.
119. З яким прискоренням падають тіла на Марсі, якщо сила притягання тіл на його поверхні у $2,8$ разів менша від сили притягання таких самих тіл на Землі?
120. М'яч масою $0,5 \text{ кг}$ після удару, що тривав $0,2 \text{ с}$, набуває швидкості 10 м/с . Визначте середню силу удару.
121. Потяг масою 500 т після припинення тяги локомотива під дією сили тертя, яка дорівнює 98 кН , зупиняється через 1 хв . З якою швидкістю їхав потяг?
122. Вагон масою 20 т рухається рівносповільнено, маючи початкову швидкість руху 54 км/год і прискорення $-0,3 \text{ м/с}^2$. Яка сила гальмування діє на вагон? Через який час вагон зупиниться? Який шлях вагон пройде до зупинки?
123. Чи можна привести в рух сталевий візок за допомогою магніту, підвешеного так, як показано на мал. 84?
124. Чи однаково стискаються буфери при зіткненні двох вагонеток вузькоколійної залізниці: 1) якщо одна з них перебуває в спокої; 2) якщо обидві рухаються; 3) якщо одна вагонетка навантажена, а інша порожня? Жорсткість буферних пружин у вагонеток однакова.

125. З погляду фізики дію не можна відрізнити від протидії. Поясніть чому.
126. Якщо сили, з якими взаємодіють тіло і динамометр під час зважування, не зрівноважуються (бо прикладені до різних тіл), то чому тіло і динамометр після певного видовження його пружини нерухомі?

§ 22 ГРАВІТАЦІЙНА ВЗАЄМОДІЯ. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

Усі тіла Всесвіту, як небесні, так і ті, що знаходяться на Землі, схильні до взаємного притягання. Якщо ж ми і не спостерігаємо його між звичайними предметами, що оточують нас у повсякденному житті (наприклад, між книгами, зошитами, меблями тощо), це лише тому, що воно в цих випадках дуже слабе.

Взаємодію, властиву всім тілам Всесвіту і яка виявляється в їх взаємному притяганні одне до одного, називають гравітаційною, а саме явище всесвітнього тяжіння — **гравітацією** (від латинської *gravitas* — тяжкість).

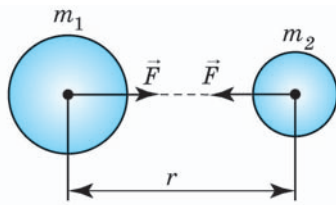
Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою особливого виду матерії, який називається **гравітаційним полем**. Таке поле існує навколо будь-якого тіла, чи то планета, камінь, людина або аркуш паперу. При цьому гравітаційне поле, створене тілом, діє на будь-яке інше тіло так, що у того з'являється прискорення, завжди напрямлене до джерела поля. Поява такого прискорення і означає, що між тілами виникає притягання.

Гравітаційне поле не слід плутати з електромагнітними полями, які існують навколо наелектризованих тіл, провідників зі струмом і магнітів.

Цікавою особливістю гравітаційного поля, якої не мають електромагнітні поля, є його всепроникна здатність. Якщо від електричних і магнітних полів можна захиститися за допомогою спеціальних металевих екранів, то від гравітаційного поля захиститися нічим не можна: воно проникає крізь будь-які матеріали.

Для виявлення гравітаційного екранування проводилися спеціальні експерименти, але вони дали негативний результат: якщо між двома тілами помістити у вигляді екрана третє тіло, то притягання між двома першими тілами послаблюється. В усякому разі, якщо екранування гравітації існує, то воно настільки слабе, що перебуває за межами точності, досягнутої в сучасних експериментах. Тому з великою впевненістю можна сказати, що ніякого «кейворита», який, за словами одного з героїв роману Г. Уеллса «Перші люди на Місяці», «не підкоряється силі тяжіння і перегороджує взаємне тяжіння між тілами», в природі не існує.

У середині XVII ст. багатьох учених цікавило питання про те, як сила взаємного притягання між тілами залежить від відстані між ними. З якою силою, наприклад, Сонце притягує до себе планети? З приводу цього питання Р. Гук у 1674 р. писав: «Сили, що притягають, тим значніше виявляють себе, чим ближче тіло, на яке вони діють, знаходиться від центра дії. В якій мірі це збільшення залежить від відстані, це я ще не визначив дослідом». Сучасникам Гука ніяк не вдавалося знайти вираз для сили тяжіння і на його основі визначити траєкторії планет. Хоча у Гука були з цього приводу припущення, але довести їх він не міг.



Мал. 85

У 1683 р. Гук спеціально зустрівся з ученими К. Реном і Е. Галлеєм, що цікавилися тим же питанням, щоб обговорити разом з ними проблему тяжіння. Але зустріч цих трьох учених ні до чого не привела. Галлей, що зневірився, звернувся з цією задачею до Ньютона. Які ж були його здивування і радість, коли він дізнався, що Ньютону вже давно відомий її розв'язок!

Вираз для сили тяжіння Ньютон отримав ще в 1666 р., коли йому було всього 24 роки. Проте звіряючи результати своєї теорії з даними досліду, він виявив розбіжності і тому не публікував свої висновки. Отже, відкритий ним закон залишався невідомий людям протягом багатьох років. З часом з'ясувалося, що дані, якими користувався Ньютон, були дуже неточними. І вже пізніше, коли йому стали відомі результати більш точних вимірювань, він, як описує це О. Лодж, «дістав свої старі рукописи і знову приступив до обчислень... Нові дані змінюють результати: у надзвичайному збудженні він переглядає очима свою роботу, перо не встигає стежити за думкою, і, нарешті, обчислення приводять його до бажаних результатів. Безмежно велике значення і глибина його відкриття настільки засліплюють його своїм сяйвом, що затьмарені очі не бачать рукопису. У знеможі він відкидає перо; таємниця Всесвіту, нарешті, відкрилася йому, єдиному у світі...».

Спочатку Ньютон встановив, як залежить від відстані прискорення вільного падіння. Він помітив, що поблизу поверхні Землі, тобто на відстані 6400 км від її центра, це прискорення становить $9,8 \text{ м/с}^2$, а на відстані, в 60 разів більшій, біля Місяця, це прискорення виявляється в 3600 разів менше, ніж на Землі, але $3600 = 60^2$. Отже, прискорення вільного падіння зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані від центра Землі. Проте прискорення за другим законом Ньютона пропорційне силі. Отже, причиною такого зменшення прискорення є аналогічна залежність сили притягання від відстані.

Остаточну формулу сили притягання можна отримати, якщо врахувати, що ця сила має бути пропорційна масам тіл m_1 і m_2 . Таким чином,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.13)$$

де G — коефіцієнт пропорційності, який називається **гравітаційною сталою**. Мова про неї буде йти у наступному параграфі.

Так Ньютон знайшов вираз для сили гравітаційної взаємодії Землі з тілами, що притягаються нею. Але інтуїція підказувала йому, що за отриманою формулою можна розраховувати і силу тяжіння, що діє між будь-якими іншими тілами Всесвіту, якщо тільки їх розміри малі порівняно з відстанню r між ними. Тому він почав розглядати отриманий вираз як **закон всесвітнього тяжіння**, справедливий і для небесних тіл, і для тіл, що знаходяться на Землі.

Сила гравітаційного притягання будь-яких двох частинок прямо пропорційна добутку їх мас і обернено пропорційна до квадрата відстані між ними.

Закон всесвітнього тяжіння сформульований для частинок, тобто для таких тіл, розміри яких значно менші за відстань r між ними. Проте одна чудова особливість цього закону дозволяє використовувати його і в деяких інших випадках. Такою особливістю є обернено пропорційна залежність сили притягання саме від квадрата відстані між частинками, а не від третьої, скажімо, або четвертої степені відстані. Розрахунки показують, що завдяки цьому формулу $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ можна застосовувати ще і для розрахунку сили притягання кулястих тіл зі сферично симетричним розподілом речовини, що знаходяться на будь-якій відстані одне від одного; тільки під r у цьому випадку слід розуміти не відстань між ними, а відстань між їх центрами (мал. 85).

Формула $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ виявляється справедливою і в проміжному випадку, коли сферичне тіло довільних розмірів взаємодіє з деякою матеріальною точкою. Це і дає можливість застосовувати формулу закону всесвітнього тяжіння для розрахунку сили, з якою земна куля притягує до себе навколишні тіла.



Це цікаво знати

Спроби пояснити будову світу, і перш за все Сонячної системи, робили багато великих людей. Що зв'язує планети і Сонце в єдину систему? Яким законам підпорядковується їх рух?

У II ст. н.е. давньогрецьким ученим Клавдієм Птолемеєм була розроблена геоцентрична система світу, згідно з якою всі спостережувані переміщення небесних світил пояснювалися їх рухом навколо нерухомої Землі.

У XVI ст. польський астроном М. Коперник запропонував геліоцентричну систему, в центрі якої знаходиться Сонце, а навколо нього рухаються планети та їх супутники. Що ж утримує планети, зокрема Землю, в їх русі навколо Сонця?

Якщо дотримуватися переконань Арістотеля і пов'язувати силу зі швидкістю руху, а не з прискоренням, то причину цього доводиться шукати саме у напрямі швидкості. Проте дивитися у напрямі швидкості Землі марно. Нічого, окрім якоїсь самотньої незначної зірки, там не побачиш.

Ісаак Ньютон пов'язав силу з прискоренням. Якщо ж подивитися у бік прискорення Землі, то там опиниться Сонце. І тому саме Сонце природно вважати причиною обертання навколо нього Землі і планет.

Але не тільки планети притягуються до Сонця. Сонце також притягується планетами. Та й самі планети взаємодіють між собою. Одним із перших, хто це зрозумів, був англійський вчений Р. Гук. Так, у 1674 р. він писав: «Усі небесні тіла мають притягання, або силу тяжіння до свого центра, внаслідок цього вони не тільки притягають власні частини і перешкоджають їм розлітатися, як спостерігаємо на Землі, а й притягають всі інші небесні тіла, що знаходяться у сфері їх дії. Тому не тільки Сонце і Місяць мають вплив на рух Землі, а й Меркурій, Венера, Марс, Юпітер, Сатурн також своїм притяганням значно впливають на її рух. Подібним чином і Земля відповідним притяганням впливає на рух кожного з цих тіл».

Остаточне підтвердження цієї ідеї було отримано в працях І. Ньютона. У своїх знаменитих «Математичних началах», де він сформулював три свої закони, думку про тяжіння Ньютон висловлює послідовно і доказово. Всі тіла Всесвіту, як небесні, так і ті, що знаходяться на Землі, стверджує Ньютон, схильні до взаємного тяжіння, причому сили, з якими притягуються всі ці тіла, мають однакову природу і підпорядковуються одному і тому самому закону.

Згідно з легендою, думка про всесвітнє тяжіння осяяла Ньютона в той момент, коли він, відпочиваючи в своєму саду, побачив падаюче яблуко. Розповідають навіть, що знаменитий яблуні, плід якої зумів так вчасно впастися до ніг Ньютона, не дали зникнути без сліду і шматочки цього дерева нібито зберігаються в Англії до цього часу.

Відкриття закону всесвітнього тяжіння дозволило Ньютону створити теорію руху небесних тіл, засновану на строгих математичних доведеннях. Нічого подібного в науці до того часу не було.

Проте сильне враження, створене цією теорією на сучасників Ньютона, не перешкодило появи у них деякого відчуття невдоволеності. Всіх тоді цікавило питання: чому всі тіла притягуються одне до одного. Ньютон відповіді на це запитання не дав. «Причину ж властивостей сили притягання я до цього часу не міг довести з явищ, гіпотез же я не вигадую, — писав він у своїх «Математичних началах». — Досить того, що притягання насправді існує і діє згідно з викладеним нами законом і цілком достатньо для пояснення всіх рухів небесних тіл і моря».

Кажучи про море, Ньютон мав на увазі явище припливів, які обумовлені притяганням води Місяцем і Сонцем. За дві тисячі років до Ньютона над причинами цього явища роздумував Арістотель, проте йому розв'язати цю проблему не вдалося. Для Арістотеля це виявилось трагедією. «Спостерігаючи тривалий час це явище зі скелі Негропонта, він, охоплений відчаєм, кинувся у море і знайшов там добровільну смерть (Г. Галілей)».

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

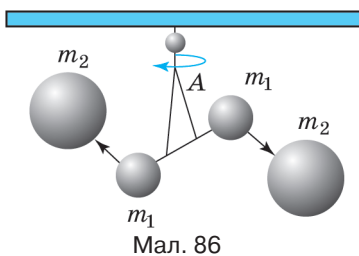
1. Яку взаємодію називають гравітаційною?
2. За допомогою чого здійснюється гравітаційна взаємодія?
3. Назвіть властивості гравітаційного поля.
4. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння. Для яких тіл він справедливий?
5. Що слід розуміти під r у формулі $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ при розрахунку сили гравітаційної взаємодії куль? Як називається коефіцієнт пропорційності G у законі всесвітнього тяжіння?

§ 23 ГРАВИТАЦІЙНА СТАЛА

Коли Ньютон відкрив закон всесвітнього тяжіння, він не знав жодного числового значення мас небесних тіл, у тому числі й Землі. Невідомо йому було і значення сталої G .

Тим часом гравітаційна стала G має для всіх тіл Всесвіту одне і те ж значення і є однією з фундаментальних фізичних констант. Яким же чином можна визначити її значення?

Із закону всесвітнього тяжіння випливає, що $G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2}$. Отже, для того,



щоб визначити G , потрібно виміряти силу притягання F між тілами відомих мас m_1 і m_2 та відстань r між ними.

Перші вимірювання гравітаційної сталої були здійснені в середині XVIII ст. Оцінити, однак, дуже грубо, значення G у той час вдалося завдяки вивченню притягання маятника до гори, маса якої була визначена геологічними методами.

Точні вимірювання гравітаційної сталої вперше були проведені у 1798 р. вченим **Г. Кавендішем** — багатим дивакуватим англійським лордом. За допомогою так званих крутильних терезів (мал. 86) Кавендіш за кутом закручування нитки A зумів виміряти таку малу силу притягання між маленькими і великими металевими кулями, якою можна нехтувати. Для цього йому довелося використовувати дуже чутливі прилади, оскільки навіть слабкі повітряні потоки могли спотворити вимірювання. Щоб виключити сторонні впливи, Кавендіш розмістив свої прилади в ящику, який залишив у кімнаті, а сам проводив спостереження за приладами за допомогою телескопа з іншого приміщення.

Досліди показали, що

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Фізичний зміст гравітаційної сталої полягає в тому, що вона визначається силою, з якою притягуються два тіла масами по 1 кг кожне, що знаходяться на відстані 1 м одне від одного.

Ця сила, таким чином, виявляється надзвичайно малою всього лише $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н. Добре це чи погано? Розрахунки показують, що якби гравітаційна стала у нашому Всесвіті мала значення, скажімо, в 100 разів більше, ніж наведене вище, то це призвело б до того, що час існування зірок, зокрема Сонця, різко зменшився б і розумне життя на Землі не встигло б з'явитися.

Мале значення G обумовлює те, що гравітаційна взаємодія між звичайними тілами, не говорячи вже про атоми і молекули, є дуже слабкою. Дві людини масою по 60 кг на відстані 1 м одна від одної притягуються з силою, що дорівнює всього лише 0,24 мкН.

Проте у міру збільшення мас тіл роль гравітаційної взаємодії зростає. Так, сила взаємного притягання Землі і Місяця досягає 1020 Н, а притягання Землі Сонцем ще у 150 разів сильніше. Тому рух планет і зірок вже повністю визначається гравітаційними силами.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає фізичний зміст гравітаційної сталої?
2. Ким вперше були виконані точні вимірювання цієї сталої?
3. Розкажіть, до чого приводять різні значення гравітаційної сталої.

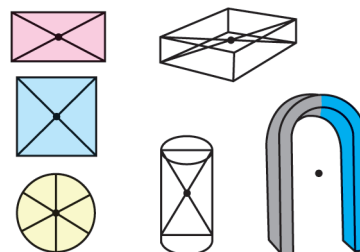
§ 24 СИЛА ТЯЖІННЯ

Позначимо масу Землі M , її радіус R , масу даного тіла m , тоді сила, що діє на тіло поблизу поверхні Землі, згідно з законом всесвітнього тяжіння має вигляд

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{Mm}{R^2}, \quad (2.14)$$

Це і є **сила тяжіння**.

Сила, з якою Земля притягує до себе тіла, називається силою тяжіння, а гравітаційне поле Землі — **полем тяжіння**.



Мал. 87



Мал. 88

Дослідами доведено, що сила тяжіння напрямлена вниз, до центра Землі. У тілі ж вона проходить через точку, яка називається **центром тяжіння**.

Центр тяжіння однорідного тіла (наприклад, кулі, прямокутної або круглої пластини, циліндра тощо) знаходиться в центрі симетрії цього тіла. При цьому центр тяжіння може і не збігатися з жодною точкою даного тіла (наприклад, у дугоподібного магніту) (мал. 87).

Взагалі, якщо потрібно знайти центр тяжіння будь-якого плоского тіла неправильної форми, слід виходити з наступної закономірності: тіло треба підвісити на нитці (мал. 88), що послідовно прикріплюється до різних його точок, і точка, в якій відмічені ниткою напрями перетнуться, і буде центром тяжіння цього тіла.

Якщо на тіло діє тільки ця сила (а всі інші врівноважені), то воно здійснює вільне падіння. Прискорення вільного падіння можна визначити, застосувавши другий закон Ньютона:

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{Mm}{R^2 m} = G \frac{M}{R^2}. \quad (2.15)$$

Звідси видно, що **прискорення вільного падіння \vec{g} не залежить від маси m тіла**, а отже, воно однакове для всіх тіл. Таку дивовижну властивість має сила всесвітнього тяжіння, а значить, і сила тяжіння. Дослідним шляхом вона була виявлена ще Галілеєм. Дивовижна тому, що за другим законом Ньютона прискорення тіла повинно бути обернено пропорційним до маси, а сама сила тяжіння пропорційна масі тіла, на яке вона діє. Саме тому прискорення вільного падіння однакове для всіх тіл.

Тепер можна записати вираз для сили тяжіння:

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}. \quad (2.16)$$

Строго кажучи, формула $g = G \frac{M}{R^2}$, як і другий закон Ньютона, справедлива, коли вільне падіння розглядається відносно інерціальної системи відліку. На поверхні Землі інерціальною системою відліку можуть бути системи відліку, пов'язані з полюсами Землі, що не беруть участі в її добовому обертанні. Решта всіх точок земної поверхні рухається по колу з доцентровими прискореннями, і системи відліку, пов'язані з цими точками, неінерціальні. Для них другий закон Ньютона незастосовний. Обертання Землі призводить до того, що прискорення вільного падіння, виміряне

відносно деякого тіла, закріпленого на поверхні Землі, на різних широтах буде різним.

Інша, менш істотна причина того, що прискорення вільного падіння в різних точках Землі різне, пов'язана з тим, що земна куля трохи сплюснута поблизу полюсів.

Досліди показують, що прискорення вільного падіння, виміряне відносно поверхні Землі біля полюсів, дорівнює приблизно $9,83 \text{ м/с}^2$, на екваторі — $9,78 \text{ м/с}^2$, а на широті 45° — $9,81 \text{ м/с}^2$.

Наведені значення показують, що прискорення вільного падіння у різних точках земної кулі розрізняється несуттєво і дуже мало відрізняється від значення, обчисленого за формулою $g = G \frac{M}{R^2}$, $g = 9,83 \text{ м/с}^2$.

Тому при грубих розрахунках нехтують неінерціальністю системи відліку, пов'язаної з поверхнею Землі, і відмінністю форми Землі від сферичної. Прискорення вільного падіння вважають усюди однаковим і обчислюють за формулою $g = G \frac{M}{R^2}$.

У деяких точках земної кулі прискорення вільного падіння відрізняється від наведеного вище значення ще з однієї причини. Такі відхилення спостерігаються у тих місцях, де в надрах Землі залягають породи, густина яких більша або менша за середню густину Землі. Там, де є поклади порід, що мають більшу густину, значення g більше. Це дозволяє геологам за виміряними значеннями g знаходити родовища корисних копалин.

Нарешті, сила тяжіння, а отже, і прискорення вільного падіння змінюються при віддаленні від поверхні Землі. Якщо тіло знаходиться на висоті h над поверхнею Землі, то вираз для модуля прискорення вільного падіння g потрібно записувати у вигляді:

$$g = G \frac{M}{(R+h)^2}. \quad (2.17)$$

Так, при підніманні на висоту 300 км прискорення вільного падіння зменшується на 1 м/с^2 . З наведеної формули видно, що при висотах над Землею не тільки в кілька десятків або сотень метрів, а й навіть багатьох кілометрів сила тяжіння може вважатися сталою, незалежною від положення тіла. Тільки тому вільне падіння поблизу Землі і можна вважати **рівноприскореним рухом**.

Вимірювання маси тіла зважуванням. Ви вже дізналися, що масу тіла можна визначити, вимірюючи відношення модулів прискорень (переміщень) при взаємодії цього тіла з тілом, прийнятим за еталон маси. Зрозуміло, що цей спосіб дуже незручний і на практиці зазвичай не застосовується. Розглянемо інший, зручніший спосіб вимірювання маси. Цей спосіб називають **зважуванням**. Визначення маси методом зважування засноване на тому, що сила тяжіння, яка діє на тіло, і маса цього тіла пропорційні одна одній: $F_{\text{тяж}} = mg$.

А силу тяжіння можна виміряти динамометром (пружинними терезами). Вимірявши силу тяжіння $F_{\text{тяж}}$ і знаючи прискорення g вільного падіння в тому місці, де проводиться зважування, визначаємо масу тіла за формулою

$$m = \frac{F_{\text{тяж}}}{g}. \quad (2.18)$$

Ще зручніше визначати масу тіла зважуванням на важільних терезах. Коли терези врівноважені, можна стверджувати, що на тіло (на одній чашці терезів) і гирі (на іншій чашці) діє однакова сила тяжіння. А це означає, що і маса тіла дорівнює масі гир. Оскільки на гирях вказані саме їхні маси, то про масу тіла ми дізнаємося, просто додавши числа, проставлені на гирях.

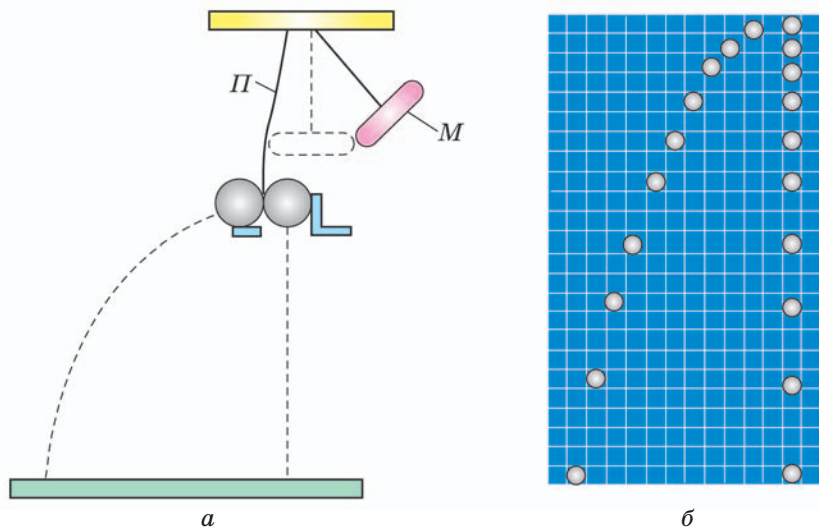
Важільні терези — дуже чутливий прилад. Найменша маса, яку можна виміряти найчутливішими терезами, становить кілька мільярдних часток кілограма.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називається силою тяжіння?
2. Прискорення вільного падіння тіл не залежить від їх маси. А сила тяжіння?
3. Чи однакова сила тяжіння в усіх точках на земній кулі?
4. За якою формулою слід визначати силу тяжіння, якщо тіло знаходиться поблизу поверхні Землі?
5. Чи впливає обертання Землі навколо її осі на силу тяжіння?
6. Чи змінюється сила тяжіння при віддаленні тіла від поверхні Землі?
7. Як напрямлена сила тяжіння, що діє на будь-яке тіло?
8. Як розраховується сила тяжіння, якщо тіло знаходиться на висоті, що дорівнює радіусу Землі?

§ 25 РУХ ТІЛ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

У 1638 р. в Лейдені вийшла книга Галілея «Бесіди і математичні доведення, що стосуються двох нових галузей науки». Четвертий розділ цієї книги називався «Про рух кинутих тіл». Багато зусиль витратив Галілей, щоб переконати людство у тому, що у безповітряному просторі «свинцева дробинка повинна падати з такою ж швидкістю, як гарматне ядро». А коли він розповів світу про те, що ядро, яке вилетіло з гармати в горизонтальному напрямі, зна-



Мал. 89

ходиться у польоті стільки ж часу, скільки і ядро, що просто випало з її жерла на Землю, йому взагалі не повірили. Тим часом це дійсно так: **тіло, кинуте з деякої висоти в горизонтальному напрямі, рухається до Землі протягом такого ж часу, начебто воно просто впало з тієї ж висоти вертикально вниз.**

Щоб переконатися в цьому, скористаємося приладом, принцип дії якого ілюструє мал. 89, *а*. Після удару молоточком M по пружній пластині P кульки починають падати і, не дивлячись на різні траєкторії, одночасно досягають Землі. На мал. 89, *б* подано стробоскопічну фотографію падаючих кульок. Для отримання цієї фотографії дослід проводили в темряві, а кульки через рівні інтервали часу освітлювали яскравим спалахом світла. При цьому затвор фотоапарата був відкритий доти, поки кульки не впали на Землю. Ми бачимо, що в одні й ті ж моменти часу, коли відбувалися спалахи світла, обидві кульки знаходилися на одній і тій же висоті і тому вони одночасно досягли Землі.

Час вільного падіння з висоти h (поблизу поверхні Землі) може бути знайдений за відомою формулою $l = \frac{at^2}{2}$. Заміняючи l на h і a на g , перепишемо цю формулу у вигляді $h = \frac{gt^2}{2}$, звідки після нескладних перетворень отримаємо $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

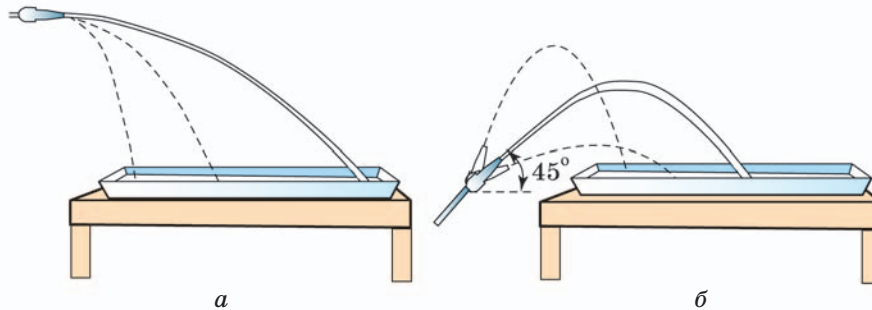
Такий самий час знаходитиметься у польоті і тіло, кинуте з тієї ж висоти в горизонтальному напрямі. У цьому випадку, згідно з Галілеєм, «до рівномірного безперешкодного руху приєднується інший, зумовлений силою тяжіння, внаслідок чого виникає складний рух, що складається з рівномірного горизонтального і прискореного рухів».

За час, що визначається виразом $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, рухаючись у горизонтальному напрямі зі швидкістю (тобто з тією швидкістю, з якою воно було кинуте), тіло переміститься вздовж горизонталі на відстань $l = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

З цієї формули випливає, що **дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямі, пропорційна початковій швидкості руху тіла і зростає із збільшенням висоти кидання.**

Щоб з'ясувати траєкторію руху тіла, в цьому випадку проведемо дослід. Приєднаємо до водопровідного крана гумову трубку з наконечником і спрямуємо струмінь води в горизонтальному напрямі. Частинки води при цьому рухатимуться так, як і кинуте в тому ж напрямі тіло. Відкриваючи або, навпаки, закриваючи кран, можна змінити початкову швидкість струменя і тим самим дальність польоту частинок води (мал. 90, *а*), проте в усіх випадках струмінь води матиме форму параболи. Щоб переконатися в цьому, позаду струменя слід поставити екран із задалегідь накресленими на ньому параболами. Струмінь води точно відповідатиме зображенням на екрані лініям.

Отже, під час вільного падіння тіло, початкова швидкість якого горизонтальна, рухається по параболічній траєкторії. По параболі рухатиметься тіло і у тому випадку, коли воно кинуте під деяким гострим кутом до горизонту. Дальність польоту в цьому випадку залежатиме не тільки від



Мал. 90

початкової швидкості руху тіла, а й від кута, під яким воно було кинуте. Проводячи досліди із струменем води, можна встановити, що найбільша дальність польоту при цьому досягається тоді, коли напрям початкової швидкості складає з горизонтом кут 45° (мал. 90, б).

При великих швидкостях руху тіл слід враховувати опір повітря. Тому дальність польоту куль і снарядів у реальних умовах виявляється не такою, як це випливає з формул, справедливих для руху в безповітряному просторі. Так, при початковій швидкості кулі 870 м/с і куті 45° за відсутності опору повітря дальність польоту становила б приблизно 77 км , тоді як насправді вона не перевищує $3,5 \text{ км}$.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

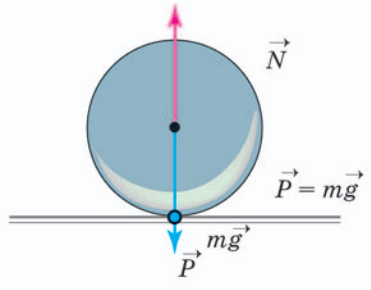
1. Яка куля впаде на Землю раніше: та, що вилетіла при пострілі з горизонтально розташованої рушниці або випадково упущена з тієї самої висоти у момент пострілу з рушниці?
2. Від чого залежить дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямі? По якій траєкторії рухається таке тіло?
3. Від чого залежить дальність польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту? По якій траєкторії рухається таке тіло?
4. Під яким кутом до горизонту слід кидати із Землі м'яч, щоб дальність його польоту виявилася максимальною?
5. Як впливає опір повітря на рух кинутих тіл?
6. По якій траєкторії рухається вантаж, скинутий з літака, відносно: а) Землі; б) літака?

§ 26 ВАГА ТІЛА. ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ І НЕВАГОМІСТЬ

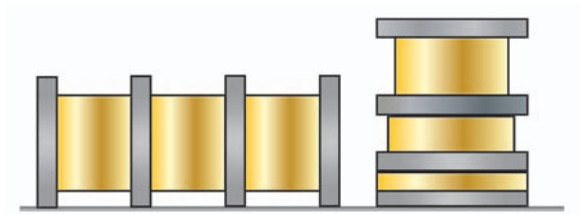
Нехай яке-небудь тіло, наприклад куля, лежить на горизонтальній опорі (мал. 91). Куля взаємодіє із Землею, і якби не було опори, то під дією сили тяжіння вона падала б на Землю з прискоренням g . Але падінню кулі перешкоджає опора.

Куля й опора взаємодіють. Куля діє на опору із силою \vec{P} , яка за модулем дорівнює силі тяжіння $m\vec{g}$, а опора на кулю — з рівною за модулем, але протилежно напрямленою силою реакції опори \vec{N} .

Силу \vec{P} , з якою тіло внаслідок його притягання до Землі діє на опору або підвіс, називають **вагою**.



Мал. 91



Мал. 92

Вага тіла визначається за формулою:

$$\vec{P} = m\vec{g}. \quad (2.19)$$

Важливо зрозуміти і запам'ятати, що вага — це сила, прикладена до опори, а не до тіла. До тіла прикладені лише сила тяжіння і сила реакції опори, що врівноважують одна одну.

Взаємодія тіла з опорою призводить до їх деформації; нижні частини тіла під дією верхніх стискаються. На мал. 92 зображено конструкцію у двох положеннях — горизонтальному і вертикальному. Поверхи конструкції зроблені з поролону, а міжповерхові перекриття — сталеві. Добре видно, що у стоячій конструкції нижні поверхи (поролонові прокладки) деформовані сильніше за верхні.

А що ж буде відчувати людина, яка перебуває на борту космічного корабля?

Після ввімкнення ракетних двигунів, коли ракета починає набувати швидкості, на людину масою m у космічному кораблі діятимуть дві сили: сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила реакції опори \vec{N} . Оскільки прискорення ракети a напрямлене вгору, то переважатиме сила реакції опори: $N > mg$. Їх рівнодійна $F = N - mg$ за другим законом Ньютона дорівнює добутку маси і прискорення ракети:

$$N - mg = ma, \text{ звідки } N = ma + mg.$$

Вага космонавта \vec{P} за третім законом Ньютона дорівнює силі реакції опори \vec{N} , тому

$$P = mg + ma = m(g + a). \quad (2.20)$$

До старту ракети вага космонавта дорівнювала силі тяжіння mg . Тепер, як це видно з останньої рівності, його вага збільшилася, перевищивши силу тяжіння на величину ma .

Стан тіла, при якому його вага перевищує силу тяжіння, називають **перевантаженням**.

Кількісно перевантаження характеризують відношенням $\frac{a}{g}$, яке позначають літерою n і називають **коефіцієнтом перевантаження**.

При n -кратному перевантаженні, тобто якщо $a = ng$, вага людини (і будь-якого іншого тіла) збільшується в $(1 + n)$ разів.

Чим менший час дії перевантаження, тим більше перевантаження здатна витримати людина. Так, встановлено, що людина, перебуваючи у вертикальному положенні, досить добре переносить перевантаження від

8g за 3 с до 5g за 12—15 с. При миттєвій дії, коли вона триває менше, ніж 0,1 с, людина здатна переносити двадцятикратні і навіть більші перевантаження.

Після вимкнення двигунів, коли космічний корабель виходить на орбіту навколо Землі, його прискорення, як ми знаємо, стає рівним прискоренню вільного падіння: $\vec{a} = \vec{g}$. Таке саме прискорення буде й у космонавта, який перебуває всередині корабля. Це прискорення напрямлене вниз, до центра Землі, і тому тепер із двох сил \vec{N} і $m\vec{g}$, що діють на космонавта, переважаючою виявляється сила тяжіння. Їх рівнодійна $F = mg - N$ за другим законом Ньютона дорівнює добутку маси і прискорення космонавта, тобто mg . Тому

$$mg - N = mg, \text{ звідки } N = 0.$$

Це означає, що опора ніяк не реагує на присутність космонавта. За третім законом Ньютона таке можливе лише у тому випадку, коли і сам космонавт не створює ніякої дії на свою опору, тобто його вага дорівнює нулю.

Стан тіла, при якому вага тіла дорівнює нулю, називається невагомістю.

Слід пам'ятати, що невагомість означає відсутність ваги, а не маси. Маса тіла у стані невагомісті, залишається такою самою, як і була.

У стані невагомісті всі тіла та їх окремі частини перестають тиснути одне на одне. Космонавт при цьому перестає відчувати власну вагу (мал. 93); предмет, випущений з його пальців, нікуди не падає; маятник завмирає у відхиленому положенні; зникає різниця між підлогою і стелею. Всі ці явища пояснюються тим, що гравітаційне поле надає всім тілам у космічному кораблі одне й те саме прискорення. Саме тому випущений космонавтом предмет (без надання йому швидкості) нікуди не падає: адже він не може ні «наздогнати» жодну із стінок кабіни, ні «відстати» від неї; всі вони — і предмети і стіни — рухаються з однаковим прискоренням.

Одночасно невагомість в умовах орбітального польоту відіграє роль специфічного подразника, що діє на організм людини. Вона істотно впливає на багато його функцій: слабшають м'язи й кістки, організм обезводнюється тощо. Проте всі ці зміни, викликані невагомістю, оборотні. За допомогою лікувальної фізкультури, а також лікарських препаратів нормальні функції організму можуть бути відновлені.

У стані невагомісті може перебувати не тільки космонавт в орбітальній космічній станції, а й будь-яке вільно падаюче (без обертання) тіло. Щоб випробувати цей стан, досить зробити простий стрибок: між моментом відриву від Землі і моментом приземлення ви будете невагомі.

Готуючи космонавтів до космічного польоту, стан невагомісті моделюють у спеціальних літаках-лабораторіях. Для відтворення на літаку стану невагомісті треба перевести літак в режим набору висоти по параболічній траєкторії з прискоренням, що



Мал. 93

дорівнює прискоренню вільного падіння. Поки літак рухатиметься по висхідній, а потім по низхідній частині параболи, пасажири в ньому будуть невагомі.

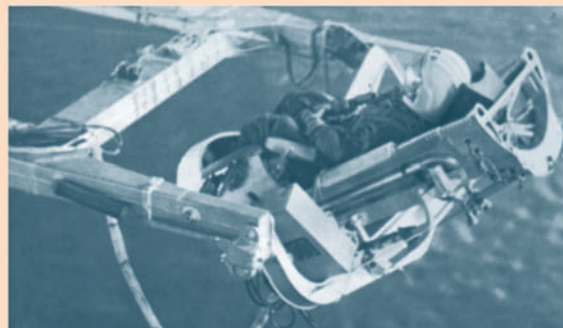


Це цікаво знати

«...Погляд мій зупинився на годиннику. Стрілки показували 9 годин 7 хвилин за московським часом. Я почув свист і наростаюче гудіння, відчув, як гігантська ракета затремтіла всім своїм корпусом і поволі, дуже поволі відірвалася від стартового пристрою... Могутні двигуни ракети створювали музику майбутнього, напевно, ще більш хвилюючу і прекрасну, ніж найбільші творіння минулого...» Так описував свій старт у космічний простір 12 квітня 1961 р. перший космонавт планети Юрій Олексійович Гагарін (1934—1968).

«Я відчув, — згадував Гагарін, — якась непереборна сила все більше і більше вдавлює мене в крісло. І хоча воно було розташоване так, щоб якнайбільше скоротити вплив величезного навантаження на моє тіло, було важко поворушити рукою і ногою...»

При перевантаженні не тільки все тіло починає тиснути сильніше на опору, а й окремі частини цього тіла починають сильніше тиснути одна на одну. Людині в стані перевантаження важко дихати, погіршується серцева діяльність, відбувається перерозподіл крові, її приплив (або відплив) до голови тощо. Тому переносити значні перевантаження можуть тільки добре треновані люди. Тренування відбувається на спеціальній центрифугі (мал. 94).



Мал. 94

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке перевантаження? Коли воно настає?
2. Що називають коефіцієнтом перевантаження?
3. У скільки разів збільшується вага тіла при 9-кратному перевантаженні? Чому?
4. Які сили діють на космонавта в ракеті, що стартує? Як вони напрямлені? Яка з них більша? Виконайте відповідний малюнок.
5. Що таке невагомість? Коли вона виникає?
6. Як невагомість впливає на організм людини?

§ 27 ШТУЧНІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ. РОЗВИТОК КОСМОНАВТИКИ

У роботах Ньютона можна знайти чудовий малюнок, що показує, як можна здійснити перехід від простого падіння тіла по параболі до орбітального руху тіла навколо Землі (мал. 95). «Кинутий на землю камінь, — писав Ньютон, — відхилиться під дією тяжіння від прямолінійного шляху і, описавши криву траєкторію, впаде нарешті на Землю. Якщо його кинути з більшою швидкістю, то він впаде далі». Продовжуючи ці міркування, неважко дійти висновку: якщо кинути камінь з високої гори, надавши йому досить великої швидкості, то його траєкторія могла б стати такою, що він взагалі ніколи не впаде на Землю, перетворившись на її **штучний супутник**.

Мінімальна швидкість, яку необхідно надати тілу біля поверхні Землі, щоб перетворити його на штучний супутник, називається **першою космічною швидкістю**.

Для запуску штучних супутників застосовують ракети, що піднімають супутник на задану висоту і надають йому в горизонтальному напрямі необхідну швидкість. Після цього супутник відділяється від ракети-носія і продовжує подальший рух під дією лише гравітаційного поля Землі. (Слід зазначити, що впливом Місяця, Сонця та інших планет ми нехтуємо.) Прискорення, що надається цим полем супутнику, є прискоренням вільного падіння \bar{g} . Разом з тим, оскільки супутник рухається по коловій орбіті, це прискорення є доцентровим і тому дорівнює відношенню квадрата швидкості руху супутника до радіуса його орбіти. Таким чином,

$$g = \frac{v^2}{r}, \text{ звідки } v = \sqrt{gr}.$$

Підставляючи у дану формулу вираз $g = G \frac{M}{R^2}$, отримаємо

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{r}} = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}. \quad (2.21)$$

Отже, це формула для колової швидкості руху супутника, тобто такої швидкості, яку має супутник, рухаючись по коловій орбіті радіусом r на висоті h від поверхні Землі.

Щоб визначити першу космічну швидкість v_1 , слід врахувати, що вона визначається як швидкість супутника поблизу поверхні Землі, тобто коли $h \ll R_3$ і $r \approx R_3$. Враховуючи це у попередній формулі, маємо

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}. \quad (2.22)$$



Мал. 95

Підстановка в цю формулу числових даних приводить до наступного результату: $v_1 = 7900 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}$.



Мал. 96

Надати тілу такої величезної швидкості вперше вдалося лише у 1957 р., коли під керівництвом уродженця Житомирщини головного конструктора, академіка С. П. Корольова було запущено перший у світі **штучний супутник Землі (ШСЗ)**. Запуск цього супутника (мал. 96) — результат видатних досягнень у галузі ракетної техніки, електроніки, автоматичного управління, обчислювальної техніки і небесної механіки.

У 1958 р. на орбіту було виведено перший американський супутник «Експлорер-1», а трохи пізніше, в 60-х роках, запуски ШСЗ здійснили також: Франція, Австралія, Японія, Китай, Великобританія та ін., причому багато супутників було запущено за допомогою американських ракет-носіїв.

На сьогодні запуск штучних супутників є звичною справою, і в практиці космічних досліджень вже давно набула поширення міжнародна співпраця.

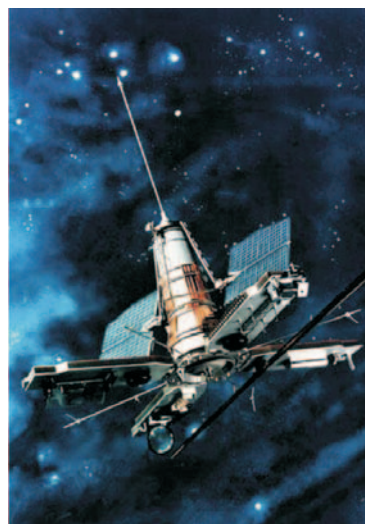
Супутники, що їх запускають у різних країнах, можуть бути розділені за своїм призначенням на два класи:

1. Науково-дослідні супутники. Вони призначені для вивчення Землі як планети, її верхніх шарів атмосфери, навколземного космічного простору, Сонця, зірок і міжзоряного середовища.

2. Прикладні супутники. Вони слугують задоволенню земних потреб людства. Сюди відносять супутники зв'язку, супутники для вивчення природних ресурсів Землі, метеорологічні супутники, навігаційні, військові тощо. На мал. 97 зображено український супутник «Січ-1».

До ШСЗ, які призначені для польоту людей, належать пілотовані **кораблі-супутники** та **орбітальні станції**.

Крім супутників, що працюють на навколземних орбітах, навколо Землі обертаються і так звані допоміжні об'єкти: останні ступені ракет-носіїв, головні обтічники і деякі інші деталі, що відокремлюються від ШСЗ під час виведення їх на орбіти.



Мал. 97

Зазначимо, що через величезний опір повітря поблизу поверхні Землі супутник не може бути запущений дуже низько. Наприклад, на висоті 160 км він здатний зробити лише один оберт, після чого знижується і згорає в щільних шарах атмосфери. З цієї причини перший штучний супутник Землі, виведений на орбіту на висоті 228 км, пропрацював тільки три місяці.

Із збільшенням висоти опір атмосфери зменшується і на висоті $h > 300$ км стає дуже малим.

Виникає запитання: *що буде, якщо запустити супутник зі швидкістю, більшою за першу космічну швидкість.*

Розрахунки показують, якщо перевищення незначне, то тіло при цьому залишається штучним супутником Землі, але буде рухатися вже не по коловій, а по **еліптичній орбіті**. Із збільшенням швидкості орбіта супутника стає все більш витягнутою, поки нарешті не перетворюється на параболічну траєкторію.

Мінімальна швидкість, яку потрібно надати тілу поблизу поверхні Землі, щоб воно покинуло її, рухаючись по незамкнутій траєкторії, називається **другою космічною швидкістю**.

Друга космічна швидкість у $\sqrt{2}$ разів більша за першу космічну:

$$v_2 = \sqrt{2}v_1 = \sqrt{2G \frac{M_3}{R_3}}; v_2 = 11,2 \text{ км/с.}$$

При такій швидкості тіло покидає поле земного тяжіння і стає супутником Сонця. Щоб подолати притягання Сонця і покинути Сонячну систему, потрібно розвинути ще більшу швидкість — **третю космічну**. Третя космічна швидкість дорівнює 16,7 км/с. Маючи приблизно таку швидкість, автоматична міжпланетна станція «Піонер-10» (США) у 1983 р. вперше в історії людства вийшла за межі Сонячної системи і зараз летить у напрямі до зірки Барнарда.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яку швидкість називають першою космічною?
2. Як змінюється швидкість руху супутника по орбіті із збільшенням висоти?
3. Чи залежить швидкість руху супутника від його маси?
4. Як напрямлені швидкість і прискорення супутника, що рухається по коловій орбіті? Чому дорівнює прискорення такого супутника?
5. Чи можна вважати коловий рух супутника рівноприскореним? Чому?
6. На які два класи ділять штучні супутники Землі?
7. Яку швидкість називають другою космічною? Чому вона дорівнює?
8. Що таке третя космічна швидкість?
9. Що ви знаєте про станцію «Піонер-10»?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Обчисліть масу Землі, якщо відомо, що прискорення вільного падіння поблизу її поверхні дорівнює $9,8 \text{ м/с}^2$. Радіус Землі вважати рівним 6370 км.

Дано:

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$R = 6370 \text{ км} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

 $M = ?$

Розв'язання

Масу Землі не можна, звичайно, виміряти, поклавши її на терези. Але її можна обчислити, користуючись формулою для прискорення вільного падіння:

$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Звідси для маси Землі маємо $M = \frac{gR^2}{G}$.

Підставивши відомі значення, отримуємо

$$M = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 (6,37 \cdot 10^6 \text{ м})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}} \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

Маса Землі дорівнює майже шести мільйонам мільярдів кілограмів!

В і д п о в і д ь: $M \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

2. Літак летить горизонтально зі швидкістю 360 км/год на висоті 490 м. Коли він пролетів над точкою А, з нього кинули пакет. Скільки часу падав пакет і на якій відстані від точки А він упав на Землю? Опором повітря знехтувати.

Дано:

$$v_0 = 360 \text{ км/год} = 100 \text{ м/с}$$

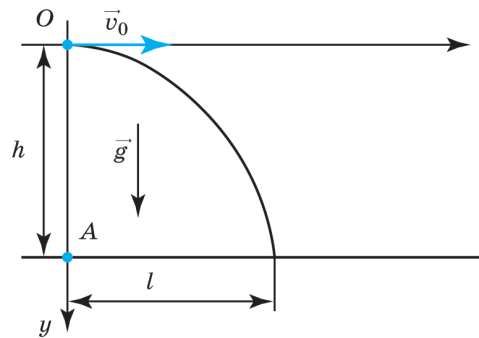
$$h = 490 \text{ м}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

 $t = ? \quad l = ?$

Розв'язання

Виконаємо малюнок.



Переміщення пакета по вертикалі дорівнює: $h = \frac{gt^2}{2}$. Звідси визначаємо

$$\text{час його падіння } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; t = \sqrt{\frac{2 \cdot 490 \text{ м}}{9,8 \text{ м/с}^2}} = \sqrt{100 \text{ с}^2} = 10 \text{ с}.$$

Відстань, на яку впав пакет, дорівнює: $l = v_0 t; l = 100 \text{ м/с} \cdot 10 \text{ с} = 1000 \text{ м}$.

Отже, час падіння пакета дорівнює 10 с, а відстань, на яку він перемістився в горизонтальному напрямі.— 1000 м.

В і д п о в і д ь: $t = 10 \text{ с}, l = 1000 \text{ м}$.

Рівень А

127. Космічний корабель масою 8 т наблизився до орбітальної космічної станції масою 20 т на відстань 100 м. Визначте силу їх взаємного притягання.
128. Визначте силу притягання між Землею і Сонцем, якщо маси їх відповідно дорівнюють $6 \cdot 10^{24}$ і $2 \cdot 10^{30}$ кг, а відстань між ними $1,5 \cdot 10^{11}$ м.
129. Сила притягання між двома однаковими кулями 1 Н. Чому дорівнюють маси куль, коли відстань між їхніми центрами становить 1 м?
130. Якою буде сила взаємного притягання між двома супутниками Землі масою по 3,87 т кожен, якщо вони наблизяться один до одного на відстань 100 м?
131. Визначте силу притягання між двома чотиривісними навантаженими вагонами масою по 70 т кожний, якщо відстань між центрами вагонів 20 м.
132. Оцініть порядок значення сили взаємного тяжіння двох кораблів, відстань між якими 100 м, якщо маса кожного з них 10 000 т. Гравітаційна стала $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.
133. Середня густина Венери 4900 кг/м^3 , її радіус 6200 км. Визначте прискорення вільного падіння на її поверхні.
134. Яка маса тіла, якщо сила тяжіння, що діє на нього, дорівнює 49 Н? Тіло перебуває поблизу поверхні Землі.
135. М'яч, кинутий горизонтально з початковою швидкістю 25 м/с, упав на Землю через 3 с. З якої висоти було кинуте м'яч? Яка горизонтальна дальність польоту?
136. Із спортивної рушниці куля вилітає з початковою швидкістю 300 м/с, а з мисливської – 375 м/с. Порівняйте дальність польоту кулі в обох випадках, якщо рушниці було розташовано горизонтально і на однаковій висоті.
137. Предмет падає з полиці залізничного вагона, розташованої на висоті 2 м над підлогою. Вагон рухається зі швидкістю 18 км/год. На скільки переміститься вагон за час падіння предмета? ($g = 10 \text{ м/с}^2$)
138. Обчисліть вагу тіла масою 1 кг, спочатку застосувавши другий закон Ньютона, а потім – закон всесвітнього тяжіння. Порівняйте результати обчислень.
139. Визначте вагу нерухомого тіла, якщо його маса становить 2 кг; 400 г; 800 мг.
140. Визначте масу тіла, вага якого становить 10^{-5} Н; 1 Н; 49 Н.
141. Космічна ракета під час старту з поверхні Землі рухається вертикально з прискоренням 20 м/с^2 . Визначте вагу льотчика-космонавта в кабіні, якщо його маса 80 кг. Якого перевантаження зазнає льотчик?
142. На якій висоті над Землею перша космічна швидкість дорівнює 6 км/с?

Рівень В

143. Чи можна у формулі $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, не змінюючи правої частини, замість модуля сили поставити вектор сили? Чому?

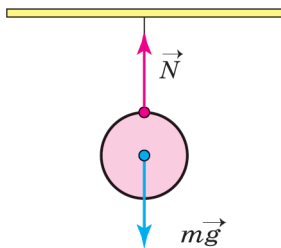
144. У скільки разів зменшується сила притягання до Землі космічної ракети під час її віддалення від поверхні Землі на відстань, що дорівнює радіусу Землі?
145. У скільки разів сила гравітаційного притягання на Марсі менша, ніж на Землі, якщо маса Марса становить $0,117$ маси Землі, а його радіус дорівнює $3,4 \cdot 10^3$ км?
146. На прямій, що з'єднує Землю і Місяць, визначте точку, в якій рівнодійна сил притягання Землі і Місяця дорівнює нулю. Відстань між Землею і Місяцем дорівнює 60 земним радіусам.
147. У земну атмосферу за рік влітає до $9 \cdot 10^9$ метеорів. Унаслідок цього маса Землі кожного року збільшується на $1 \cdot 10^6$ кг. Чи може це помітно змінити значення прискорення вільного падіння? Відповідь підтвердіть обчисленням.
148. Радіус Марса становить $0,53$ радіуса Землі, маса — $0,11$ маси Землі. Визначте прискорення вільного падіння на Марсі.
149. Відстань між центрами Землі і Місяця дорівнює 60 земним радіусам, а маса Місяця у 81 раз менша від маси Землі. В якій точці прямої, що з'єднує їх центри, тіло притягувалося б Землею і Місяцем з однаковою силою?
150. Визначте середню густину ρ планети, якщо на її екваторі покази динамометра, до якого підвішено вантаж, на 10% менші, ніж на полюсі. Тривалість доби на планеті 6 год.
151. Відстань між двома однаковими зорями зоряної системи дорівнює r . Визначте період T обертання їх навколо центра мас, якщо маса кожної зорі дорівнює m .
152. Із крутого берега річки висотою 20 м кидають горизонтально камінь зі швидкістю 15 м/с. Через скільки часу і з якою швидкістю камінь упаде у воду? Який кут утворить вектор кінцевої швидкості каменя з поверхнею води?
153. Літак летить на висоті 8 км зі швидкістю 1800 км/год. За скільки кілометрів до цілі пілот має скинути вантаж, щоб влучити у ціль? Як зміниться ця відстань, коли висота польоту буде вдвічі більшою?
154. Літак летить на висоті 400 м зі швидкістю 300 км/год. З літака треба скинути вимпел на судно, яке рухається зі швидкістю 22 км/год назустріч літаку. На якій відстані від судна треба скинути вимпел?
155. При якій тривалості доби на Землі тіла на екваторі були б невагомими? Радіус Землі 6400 км.
156. Відношення періодів обертання супутників Землі дорівнює 2 . Визначте відношення радіусів їх орбіт.
157. Два однакових потяги масами 1000 т кожний рухаються по екватору назустріч один одному зі швидкістю 30 м/с. На скільки розрізняються сили їх тиску на рейки?
158. На екваторі планети густиною 3 г/см³ вага тіла вдвічі менша, ніж на полюсі. Визначте тривалість доби на планеті.
159. Шахтна кліть у стані спокою важить 2500 Н. З яким прискоренням опустилася кліть, якщо її вага зменшилася до 2000 Н?
160. Лижник вагою $0,5$ кН рухається зі швидкістю 20 м/с по вгнутій, а потім по опуклій ділянках шляху, які мають однакові радіуси кривизни — по 20 м. Визначте вагу лижника в середній точці кожної ділянки.

161. Яку швидкість повинен мати ШСЗ, щоб обертатись по коловій орбіті на висоті 600 км над поверхнею Землі? Який період його обертання?
162. Середня висота, на якій супутник рухається над Землею, 1700 км. Визначте швидкість руху і період обертання супутника, якщо радіус Землі 6400 км.

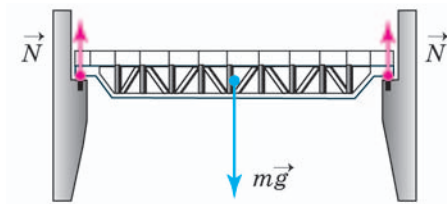
§ 28 СИЛА РЕАКЦІЇ ОПОРИ. СИЛИ ПРУЖНОСТІ

Сила реакції опори. До цих пір ми розглядали як поведуться тіла, які під дією прикладених сил можуть рухатися у будь-якому напрямі. Такі тіла називають **вільними**. У реальних пристроях переміщенню тіла часто перешкоджають інші тіла, що закріплені або стичні з ним і які називаються **опорою**.

Наприклад, тіло, підвішене на нитці до стелі (мал. 98), не падає, оскільки цьому перешкоджає опора (підвіс) — нитка. Мостова ферма (мал. 99) не падає, оскільки цьому перешкоджають опори моста. Стріла підйомального крана не падає тому, що її утримують канати й опора.

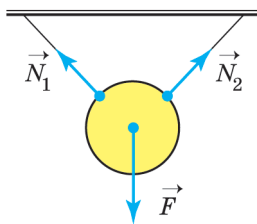


Мал. 98

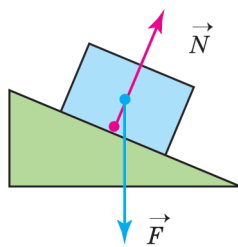


Мал. 99

Тіло, яке під впливом прикладених до нього сил повинне було б переміститися, діє на опору з деякою силою \vec{F} . Опора, у свою чергу, діятиме на тіло з такою самою за модулем, але протилежно напрямленою силою \vec{N} , яку називають **силою реакції опори**.



Напрямок сили реакції опори визначається діючими на опору силами. У тому випадку, коли відсутні сили тертя (ідеальна опора), сила реакції опори напрямлена перпендикулярно до поверхні стичних тіл у точці їх дотику. На мал. 100 наведено приклади сили реакції опори.



Мал. 100

Сили пружності. Зовнішня сила, що діє на опору, або розтягує її (мал. 101, а), або стискає (мал. 101, б), або закручує (мал. 101, в). При цьому молекули тіла зміщуються щодо своїх звичайних положень. Чим більша зовнішня сила, що деформує тіло, тим більше це зміщення. Але ми знаємо, що між молекулами діють сили притягання і відштовхування і вони протидіють зовнішній силі, що деформує тіло, (звичайно, доти, доки

відбувається пружна деформація); вони й обумовлюють виникнення сили реакції опори. Отже, сила реакції опори у даному випадку має молекулярну природу.

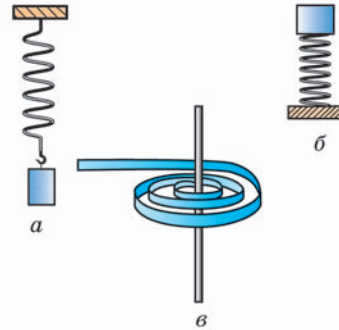
Як ви вже знаєте з 8 класу, за законом Гука абсолютна (пружна) деформація пропорційна прикладеній до тіла силі. Отже, і сили пружності пропорційні абсолютній деформації: чим більша деформація тіла, тим більші сили пружності. Математично це можна записати так: $F_{\text{пр}} \sim \Delta l$. При переході до знака рівності необхідно поставити коефіцієнт пропорційності:

$$F_{\text{пр}} = -k\Delta l. \quad (2.23)$$

Знак «мінус» стоїть тому, що сила пружності завжди протилежна за напрямом абсолютній деформації. Коефіцієнт k називають **жорсткістю**. Він визначається за формулою $k = \frac{F}{\Delta l}$. Одиницею

жорсткості в СІ є **ньютон на метр (Н/м)**.

Таким чином, **силою пружності називають силу, що виникає в тілі при його деформації. Сила пружності пропорційна абсолютній деформації і напрямлена протилежно силі, що деформує тіло.**



Мал. 101

1. Що таке сила реакції опори?

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

2. Який напрям має сила реакції опори?
3. Що таке деформація тіла? Коли вона виникає?
4. Які сили називають силами пружності? Який напрям вони мають?
5. Що таке коефіцієнт жорсткості? Яка його одиниця в СІ?
6. Назвіть, де зустрічаються сили пружності в техніці і природі.

§ 29 СИЛИ ТЕРТЯ

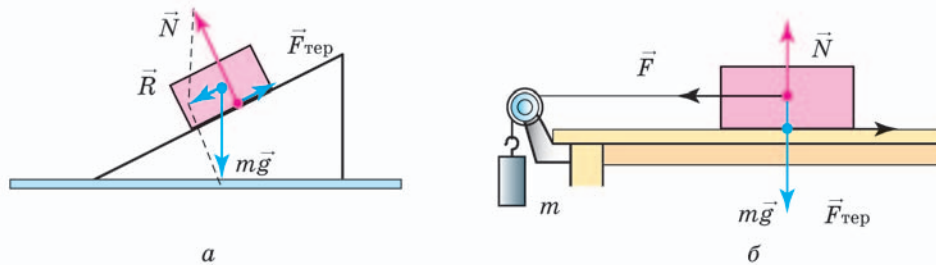
Сила тертя спокою. Під час руху тіл між ними виникають сили тертя.

Силу взаємодії дотичних поверхонь двох тіл називають **силою зовнішнього тертя**.

Зовнішнє тертя існує не тільки при русі тіл, а й тоді, коли тіла перебувають у відносному спокої. Наприклад, брусок, що лежить на похилій площині (мал. 102, а), не зісковзує тому, що сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$ врівноважує рівнодійну \vec{R} сили тяжіння $m\vec{g}$ і сили реакції опори \vec{N} .

Щоб вивчити тертя спокою, покладемо на горизонтальну поверхню стола важкий брусок, до якого прикріпимо нитку, перекинута через блок (мал. 102, б). Підвісимо до нитки важок масою m . Брусок не рухається. Отже, всі сили, що діють на нього, взаємно врівноважені. Розглянемо ці сили.

На брусок діють сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила реакції опори \vec{N} , що врівноважує силу тяжіння, а також сила \vec{F} з боку нитки. Що ж урівноважує силу \vec{F} ? Єдиною силою, що її врівноважує, може бути тільки сила, що виникає між стичними поверхнями тіл, сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$, напрямлена вздовж стичних поверхонь, але протилежно силі \vec{F} : $\vec{F}_{\text{тер}} = -\vec{F}$.



Мал. 102

Прикріпимо до нитки ще один важок, такий самий, як і перший. Брусок, як і в першому випадку, також не рухається. Отже, сила $2F$ урівноважується силою тертя. Додаючи поступово вантажі, ми побачимо, що брусок почне рухатися.

Виконаний нами дослід свідчить про те, що сила тертя існує не тільки тоді, коли брусок рухається по поверхні стола, а й тоді, коли він нерухомий відносно стола.

Тертя, що виникає між нерухомими одна відносно одної поверхнями, називають тертям спокою.

Сила тертя спокою завжди дорівнює за модулем і напрямлена протилежно силі, прикладеній до тіла паралельно поверхні дотику його з іншим тілом.

З'ясуємо, від чого і як залежить максимальна сила тертя спокою. Поставивши на брусок важку гиру, повторимо описаний вище дослід. Він проходить аналогічно, але максимальне значення сили тертя спокою в цьому випадку буде більшим. Оскільки у досліді змінилася тільки сила тиску на стичні поверхні, то можна зробити висновок, що максимальна сила тертя спокою пропорційна силі тиску. Скільки б разів ми не повторювали дослід, кожного разу результат буде один і той самий: максимальна сила тертя спокою для двох узятих поверхонь буде пропорційна силі тиску. Але згідно з третім законом Ньютона сила тиску дорівнює силі реакції опори. Отже, сила тертя спокою пропорційна силі тиску, або, що одне й те саме, силі реакції опори: $F_{\text{тер}} \sim N$.

Якщо взяти брусок, виготовлений з іншого матеріалу, і виконати досліди, аналогічні описаним, то й у цьому випадку максимальна сила тертя спокою залежатиме від сили тиску. Але її значення буде інше. Отже, максимальна сила тертя спокою залежить також від матеріалу стичних поверхонь. Запишемо це так: $F_{\text{тер}} \sim \mu_0$.

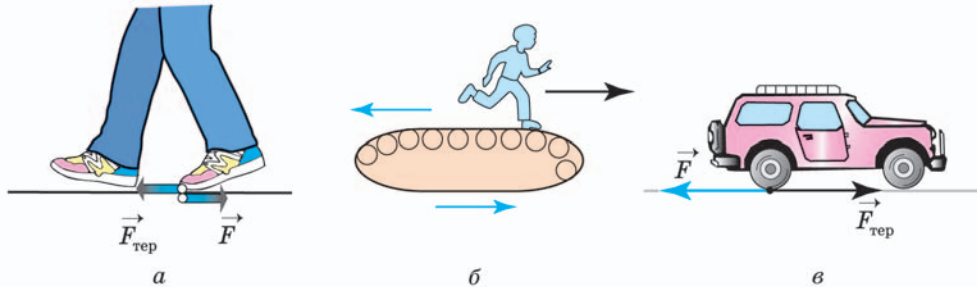
Величину μ_0 називають **коефіцієнтом тертя спокою**.

Таким чином, максимальна сила тертя спокою залежить від сили тиску N і матеріалів дотичних поверхонь:

$$F_{\text{тер}} = \mu_0 N. \quad (2.24)$$

Слід зауважити, що формулу записано не у векторній формі, оскільки сила тертя перпендикулярна до сили тиску і сили реакції опори.

Виконані нами досліди свідчать про те, що сила тертя спокою перешкоджає початку руху, утримує дотичні тіла у відносному спокої. Проте бувають випадки, коли сила тертя спокою є причиною прискорення руху тіла. Так, під час ходьби саме сила тертя спокою $\vec{F}_{\text{тер}}$, що діє на підшва взуття, надає нам прискорення (мал. 103, а). Підшва не ковзає назад, і, отже,



Мал. 103

тертя між нею і опорою (дорогою) — це тертя спокою. Сила ж \vec{F} , що дорівнює за модулем силі тертя спокою $\vec{F}_{\text{тер}}$, але протилежно напрямлена, надає прискорення опорі.

Щоб краще уявити сказане, припустимо, що людина біжить не по звичайній дорозі, а по спеціальній доріжці, встановленій на рухомих роликах (мал. 103, б). У цьому випадку людина, яка біжить, відштовхуючи доріжку, примушує її рухатися у зворотний бік. Такі доріжки застосовуються для тренування спортсменів і космонавтів.

Таким же чином колеса автомобілів та інших рухомих пристроїв відштовхуються від дороги із силою, що дорівнює силі тертя спокою (рівною за модулем і протилежною за напрямом) (мал. 103, в).

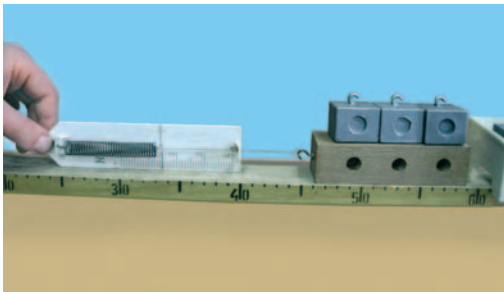
Сила тертя ковзання. Будемо тягнути брусок рукою, а силу тертя вимірювати динамометром (мал. 104). Поступово збільшуючи зусилля, побачимо, що сила тертя спокою також поступово збільшується до максимального значення $F_{\text{тер. max}}$. Але після того, як брусок почне рухатися, сила тертя стане меншою за максимальну силу тертя спокою. Це добре видно з графіка (мал. 105).

Силу тертя, що виникає під час руху одного тіла по поверхні іншого, називають **силою тертя ковзання**; напрямлена вона протилежно переміщенню тіла відносно стичного з ним тіла.

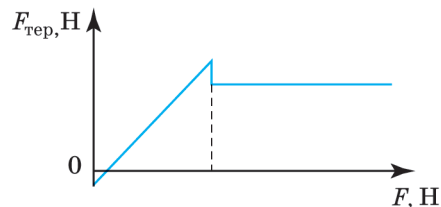
Так само, як і максимальна сила тертя спокою, сила тертя ковзання пропорційна силі тиску (силі реакції опори) і залежить від матеріалу дотичних поверхонь:

$$F_{\text{тер}} = \mu_{\text{ковз}} N. \quad (2.25)$$

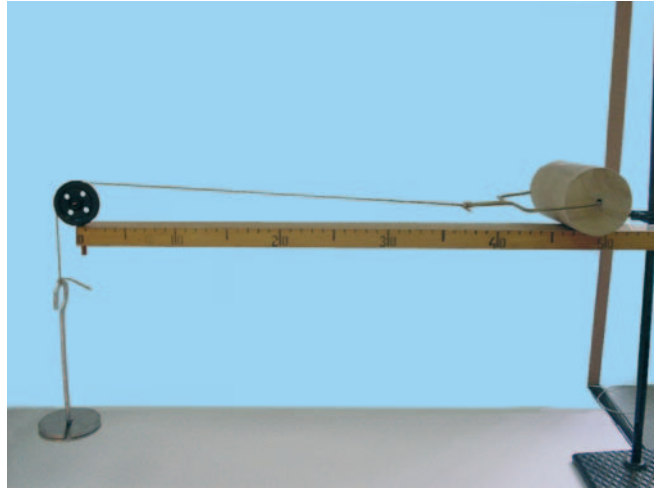
Величину $\mu_{\text{ковз}}$ називають **коефіцієнтом тертя ковзання**.



Мал. 104



Мал. 105



Мал. 106

Коефіцієнт тертя ковзання визначається відношенням сили тертя до сили реакції опори:

$$\mu_{\text{ковз}} = \frac{F_{\text{тер}}}{N}. \quad (2.26)$$

Коефіцієнт тертя зазвичай менший за одиницю. Наприклад, коефіцієнти тертя ковзання для деяких матеріалів: бронзи по чавуну (0,20—0,21); дерева по дереву (0,34—0,40); сталі по сталі (0,05—0,12); сталі по льоду (0,015—0,02); сталі по бронзі (0,07—0,15).

Залежно від значення коефіцієнта тертя ковзання стичні пари поверхонь ділять на дві групи: фрикційні (з латинської *фрикціо* — тертя), що мають великий коефіцієнт тертя ковзання (до 0,5—0,6), і антифрикційні, такі, що мають малий коефіцієнт тертя ковзання (0,15—0,12).

Сила тертя кочення. Зберемо установку, зображену на мал. 106. Підвішуючи до нитки вантажі, побачимо, що циліндр починає котитися під впливом дуже малої сили. Отже, тертя циліндра, що котиться, об горизонтальну площину мале.

Вставивши у циліндр шпильку, що не дає йому змоги обертатися, повторимо дослід. Ми виявимо, що для ковзання циліндра необхідно прикласти силу набагато більшу, ніж для її кочення.

Виконані досліди свідчать про те, що сила тертя кочення за інших рівних умов значно менша за силу тертя ковзання. Тому в тих випадках, коли потрібно зменшити силу тертя, ковзання поверхонь, що труться, ковзання замінюють коченням по ним коліс, роликів або кульок. Для цього використовують роликові й кулькові підшипники.

Візьмемо два циліндри однакового діаметра, які виготовлені з одного і того самого матеріалу — один порожнистий, а інший суцільний — і виміряємо силу тертя, що виникає між ними при коченні по горизонтальній поверхні. Ми виявимо, що сила тертя тим більша, чим більша сила тяжіння, яка діє на циліндр, тобто сила тертя кочення прямо пропорційна силі тиску, а оскільки сила тиску за модулем дорівнює силі реакції опори, то $F_{\text{коч}} \sim N$.

Візьмемо тепер два циліндри рівної маси і довжини, але один меншого радіуса, ніж інший. Вимірювання показують, що сила тертя кочення у циліндра з великим радіусом менша, ніж у циліндра з малим радіусом:

$$F_{\text{коч}} \sim \frac{1}{R}.$$

Об'єднавши результати дослідів, отримаємо $F_{\text{коч}} \sim \frac{N}{R}$.

Щоб перейти до знака рівності, треба вираз праворуч помножити на коефіцієнт пропорційності:

$$F_{\text{коч}} = \mu_{\text{коч}} \frac{N}{R}. \quad (2.27)$$

Коефіцієнт $\mu_{\text{коч}}$ називають **коефіцієнтом тертя кочення**.

З формули видно, що коефіцієнт тертя кочення — величина розмірна; він вимірюється в метрах. Коефіцієнт тертя кочення залежить від матеріалу тіл, що труться, і швидкості їх кочення. Так, для сталі по сталі він дорівнює 0,1—0,2 м, для гуми коліс автомобіля при русі по асфальту — 2 м.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яке тертя називають зовнішнім?
2. Запишіть формулу для сили тертя спокою і поясніть її.
3. Запишіть формулу для сили тертя ковзання і поясніть значення величин, що входять у неї.
4. Як сила тертя кочення залежить від радіуса тіла?
5. Які ви знаєте коефіцієнти тертя? Від чого вони залежать?
6. Наведіть приклади проявів сил тертя в техніці і природі.

Задачі та вправи

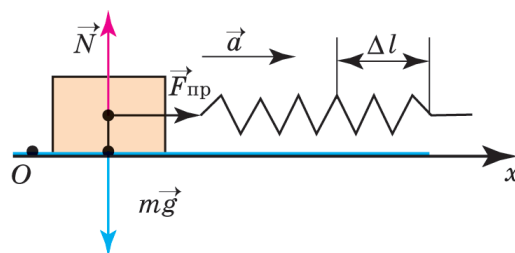
Розв'язуємо разом

1. Пружина одним кінцем прикріплена до бруска масою 0,6 кг, який знаходиться на гладенькому горизонтальному столі. Вільний кінець пружини почали переміщувати прямолінійно вздовж стола з прискоренням $0,2 \text{ м/с}^2$. Визначте жорсткість пружини, що розтягнулася на 2 см. Масою пружини і тертям знехтувати.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 0,6 \text{ кг} \\ a &= 0,2 \text{ м/с}^2 \\ x &= 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м} \\ m &= 0,6 \text{ кг} \\ k &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання
Виконаємо малюнок.



На брусок діють: сила тяжіння $m\vec{g}$, сила реакції опори \vec{N} і сила пружності $\vec{F}_{\text{пр}}$. Рівнодійна цих сил надає тілу прискорення \vec{a} .

Запишемо другий закон Ньютона у векторній формі: $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{пр}} = m\vec{a}$.

Виберемо вісь Ox і знайдемо проекції векторів. Врахувавши, що $F_{\text{пр}} = -k\Delta l$, отримаємо $k\Delta l = ma$. Звідси $k = \frac{ma}{\Delta l}$.

Підставивши значення відомих величин, визначимо $k = \frac{0,6 \text{ кг} \cdot 0,2 \text{ м/с}^2}{0,02 \text{ м}} = 6 \text{ Н/м}$. Отже, жорсткість пружини дорівнює 6 Н/м.

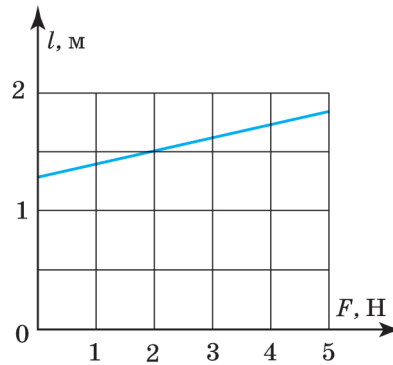
В і д п о в і д ь: $k = 6 \text{ Н/м}$.

Рівень А

163. Гиря стоїть на столі. Які сили зрівноважуються?
164. Коли до гумового шнура підвісили гирю, він подовжився. Назвіть сили взаємодії. До яких тіл прикладені сили?
165. Дріт завдовжки 5,4 м під дією навантаження подовжився на 27 мм. Визначте абсолютне видовження дроту.
166. Які сили треба прикласти до кінців дротини, жорсткість якої 100 кН/м, щоб розтягнути її на 1 мм?
167. Визначте жорсткість пружини динамометра, якщо під дією сили 27 Н вона видовжилася на 9 см. На скільки видовжиться пружина під навантаженням 18 Н?
168. Бетонну плиту вагою 120 кН рівномірно тягнуть по Землі. Сила тяги 54 кН. Визначте коефіцієнт тертя.
169. В електричному двигуні, що працює, вугільна щітка притискається до мідного колектора із силою 5 Н. Визначте силу тертя ($\mu = 0,25$).
170. На столику у вагоні потяга лежать коробка цукерок і яблуко. Чому на початку руху яблуко покотилося назад (відносно вагона), а коробка цукерок лишилася на місці?
171. Покладіть брусок на стіл і, поступово збільшуючи силу тяги, виміряйте її за допомогою динамометра. Як змінюється сила тяги під час досліду? Придумайте і виконайте дослід для встановлення залежності сили тертя від сили тиску. Чи однаковою буде сила тертя при переміщенні бруска на площині широкою і вузькою гранями? Відповідь перевірте на досліді.
172. Визначте, використовуючи лабораторний динамометр, коефіцієнт тертя однієї книжкової обкладинки по іншій.
173. На горизонтальному столі лежить вантаж m . Укажіть та намалюйте сили, які діють на нього. Що можна сказати про співвідношення цих сил?
174. Автомобіль, маса якого 14 т, рушаючи з місця, перші 50 м проходить за 10 с. Визначте силу тяги, якщо коефіцієнт опору дорівнює 0,05.
175. На похилій площині завдовжки 26 м і заввишки 10 м лежить вантаж, маса якого 26 кг. Коефіцієнт тертя дорівнює 0,5. Яку силу треба прикласти до вантажу вздовж площини, щоб витягнути вантаж?
176. Тіло масою m перебуває в спокої на похилій площині з кутом нахилу α . Чому дорівнює сила тертя спокою: μmg , $\mu mg \cos \alpha$, $\mu mg \sin \alpha$?

Рівень В

177. Чому дорівнює коефіцієнт жорсткості пружини динамометра, якщо під навантаженням 10 Н вона видовжилась на 4 см? На скільки видовжиться ця пружина під навантаженням 20 Н?
178. Дві пружини однакової довжини, скріплені одними кінцями, розтягують за вільні кінці руками. Пружина, жорсткість якої 100 Н/м, видовжилась на 5 см. Яка жорсткість іншої пружини, якщо вона видовжилась на 1 см?
179. На мал. 107 подано графік залежності зміни довжини гумового джгута від прикладеної до нього сили. Визначте жорсткість джгута.
180. Космічна ракета з вимкненим двигуном падає на Землю, ще не досягнувши атмосфери. Якої деформації (в принципі) зазнає корпус ракети під час падіння? Відповідь обґрунтуйте.
181. Брусок масою 3 кг за допомогою пружини тягнуть рівномірно по дошці, розміщеній горизонтально. Яка жорсткість пружини, якщо вона видовжилась при цьому на 5 см? Коефіцієнт тертя між бруском і поверхнею 0,25.
182. З якою швидкістю рухався вагон масою 20 т, якщо при ударі в стіну кожний буфер стиснувся на 10 см? Жорсткість пружини кожного буфера 1 МН/м.
183. Пересувайте дерев'яний брусок по столу, поклавши його боком, плазом, а також поставивши на торець. Порівняйте сили тертя в усіх випадках.
184. Іноді роблять такий дослід: склянку з водою ставлять на аркуш паперу, що лежить на столі. Різким рухом аркуш висмикують з-під склянки. Чи зміниться результат дослідів, якщо на папір поставити порожню склянку? Відповідь перевірте на досліді і поясніть.
185. До вертикальної стіни притиснули дошку вагою 15 Н. Коефіцієнт тертя дошки об стіну 0,3. З якою найменшою силою треба притискати дошку, щоб вона не зсувалася вниз?
186. Брусок вагою 40 Н затиснуто між двома дошками. Кожна дошка тисне на брусок із силою 50 Н. Коефіцієнт тертя між поверхнею бруска і дошкою 0,5. Яку силу треба прикласти до бруска, щоб виштовхнути його вниз?
187. На підлозі лежать сім листів сталі вагою по 50 Н. Яку горизонтальну силу треба прикласти, щоб зсунути чотири верхніх листи? Щоб, притримуючи три верхніх листи, витягнути тільки четвертий лист? Коефіцієнт тертя між листами дорівнює 0,2.
188. Щоб рівномірно піднімати вантаж за допомогою каната, перекинутого через балку, потрібно прикладати зусилля 270 Н, а щоб опускати — 250 Н. Визначте вагу вантажу і силу тертя об балку.
189. При якому мінімальному коефіцієнті тертя між взуттям і біговою доріжкою спортсмен може пробігти зі старту 100 м за 10 с, прискорю-



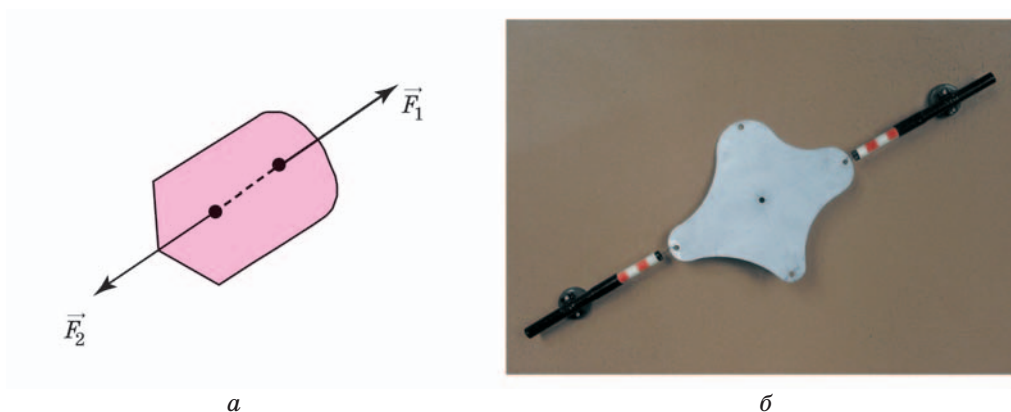
Мал. 107

- ючись тільки на першому відрізку довжиною 20 м? Чому дорівнює максимальна швидкість під час пробігу?
190. У скільки разів підвищиться сила опору повітря, якщо швидкість автомобіля збільшиться на 50 % (сила опору пропорційна квадрату швидкості)?
 191. На подолання яких сил витрачається потужність двигуна літака?
 192. Ешелон якої маси може тягти тепловоз із прискоренням $0,1 \text{ м/с}^2$, розвиваючи максимальне тягове зусилля 300 кН, якщо коефіцієнт опору дорівнює 0,005?
 193. По горизонтальній ділянці шляху тягнуть санки з вантажем, загальна маса яких 120 кг. Мотузок утворює з горизонталлю кут 45° , а його сила натягу дорівнює 75 Н. Визначте коефіцієнт тертя ковзання, якщо санки рухаються з прискоренням $0,3 \text{ м/с}^2$.
 194. Тролейбус масою 12,5 т рушає з місця і протягом 3 с досягає швидкості 15 км/год. Яку силу тяги розвиває двигун тролейбуса під час руху, якщо вважати рух рівноприскореним і силу опору прийняти рівною 0,02 маси тролейбуса?
 195. На борт корабля висотою 5 м за допомогою мотузки рівноприскорено піднімають відро з водою за 5 с. Маса відра з водою 10 кг. Визначте силу натягу мотузки.

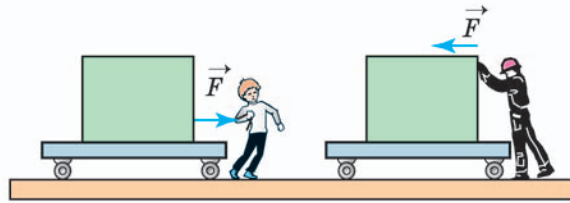
§ 30 РІВНОВАГА ТІЛ

Як ви вже знаєте, при поступальному русі тіла можна розглядати рух тільки однієї точки тіла — його центра мас. При цьому ми повинні вважати, що в центрі мас зосереджена вся маса тіла і до нього прикладена рівнодійна всіх сил, що діють на тіло. З другого закону Ньютона випливає, що прискорення цієї точки дорівнює нулю, якщо геометрична сума всіх прикладених до неї сил — рівнодійна цих сил — дорівнює нулю. Це і є умова рівноваги тіла за відсутності його обертання.

Щоб тіло, яке може рухатися поступально (без обертання), перебувало в рівновазі, необхідно, щоб геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнювала нулю.



Мал. 108



Мал. 109

Але якщо геометрична сума сил дорівнює нулю, то і сума проекцій векторів цих сил на будь-яку вісь також буде дорівнювати нулю. Тому умову рівноваги тіла можна сформулювати і так.

Щоб тіло, яке не має осі обертання, перебувало в рівновазі, необхідно, щоб сума проекцій прикладених до тіла сил на будь-яку вісь дорівнювала нулю.

У рівновазі, наприклад, перебуває тіло, до якого прикладено дві рівні сили, що діють уздовж однієї прямої, але напрямлені в протилежні боки (мал. 108, а). На мал. 108, б показано, як такий випадок можна спостерігати за допомогою досліду.

Стан рівноваги — це не обов'язково стан спокою. З другого закону Ньютона випливає, що коли рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, тіло може рухатися прямолінійно і рівномірно. При такому русі тіло також перебуває в стані рівноваги. Наприклад, парашутист, після того як він почав падати зі сталою швидкістю, перебуває в стані рівноваги.

На мал. 108, а сили прикладено до тіла не в одній точці. Проте ми вже бачили, що важлива не точка прикладання сили, а пряма, вздовж якої вона діє. Перенесення точки прикладання сили вздовж лінії її дії нічого не змінює ні в русі тіла, ні в стані рівноваги. Зрозуміло, наприклад, що нічого не зміниться, якщо замість того щоб тягнути вагонетку, її почнуть штовхати (мал. 109).

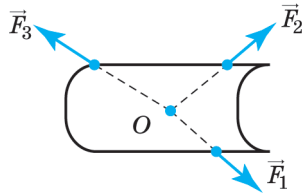
Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не дорівнює нулю, то для того, щоб тіло перебувало в стані рівноваги, до нього повинна бути прикладена додаткова сила, що дорівнює за модулем рівнодійній, але протилежна їй за напрямом.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

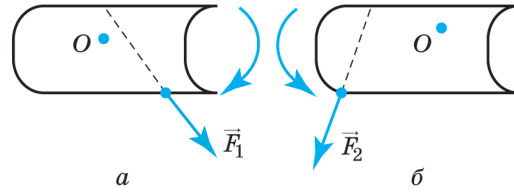
1. Що означає вираз: тіло (або система тіл) перебуває в стані рівноваги?
2. До тіла прикладено декілька сил, рівнодійна яких не дорівнює нулю. Що потрібно зробити, щоб тіло опинилося в стані рівноваги?
3. У чому полягає умова рівноваги тіл, що рухаються поступально?
4. Чи означає рівновагу стан спокою тіла?
5. Якщо геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то чому дорівнює алгебраїчна сума проекцій цих сил на будь-яку вісь?

§ 31 УМОВА РІВНОВАГИ ТІЛА, ЩО МАЄ ВІСЬ ОБЕРТАННЯ. МОМЕНТ СИЛИ

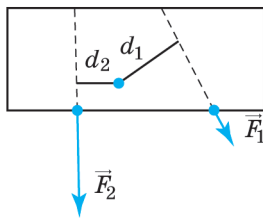
Вище ми з'ясували умови рівноваги тіла за відсутності його обертання. Проте як забезпечується відсутність обертання тіла?



Мал. 110



Мал. 111



Мал. 112

Щоб відповісти на це запитання, розглянемо тіло, що не може здійснювати поступального руху, але може повертатися або обертатися. Щоб зробити неможливим поступальний рух тіла, його досить закріпити в одній точці так, як можна, наприклад, закріпити дошку на стіні, прибивши її одним цвяхом; поступальний рух такої дошки стає неможливим, але дошка може повертатися навколо цвяха, який слугує їй віссю обертання.

Які ж сили можуть викликати поворот тіла? З'ясуємо спочатку, які сили не можуть, а потім які можуть викликати поворот (обертання) тіла із закріпленою віссю.

На мал. 110 показано деяке тіло, яке може повертатися навколо осі O , що перпендикулярна до площини сторінки. З малюнка видно, що сили \vec{F}_1 , \vec{F}_2 і \vec{F}_3 не спричинять поворот тіла. Лінії їх дії проходять через вісь обертання. Будь-яка така сила буде врівноважена силою реакції закріпленої осі.

Поворот (або обертання) можуть викликати лише такі сили, лінії дії яких не проходять через вісь обертання. Сила \vec{F}_1 , наприклад, прикладена до тіла так, як показано на мал. 111, а, змусить тіло повернутися за годинниковою стрілкою. Сила \vec{F}_2 (мал. 111, б) також викличе поворот тіла, але проти годинникової стрілки.

Щоб зробити поворот (або обертання) неможливим, потрібно, очевидно, прикласти до тіла принаймні дві сили: одну, що буде змушувати повертатися його за годинниковою стрілкою, іншу — проти годинникової стрілки. Але ці дві сили можуть не дорівнювати одна одній (за модулем). Наприклад, сила \vec{F}_2 (мал. 112) викличе поворот тіла проти годинникової стрілки.

Як показує дослід, її можна зрівноважити силою \vec{F}_1 , що спричиняє поворот тіла за годинниковою стрілкою, але за модулем є меншою, ніж сила \vec{F}_2 . Отже, у цих двох неоднакових за модулем сил однакова обертальна дія. *Що ж у них спільного?* З досліду випливає, що в цьому випадку однаковими є добуток модуля сили і відстані від осі обертання до лінії дії сили. Ця відстань позначається відповідно літерами d_1 і d_2 і називається **плечем сили, яке дорівнює довжині перпендикуляра, опущеного від центра обертання на напрям дії сили**. Плечем сили \vec{F}_1 є відстань d_1 , а плечем сили \vec{F}_2 є відстань d_2 .

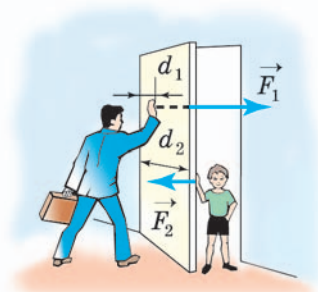
Отже, обертальна дія сили характеризується добутком модуля сили і її плеча.

Фізична величина, яка визначається добутком модуля сили \vec{F}_1 і її плеча d , називається **обертальним моментом, або моментом сили відносно осі обертання**:

$$\vec{M} = \vec{F}d. \quad (2.28)$$

Слова «відносно осі» необхідні у визначенні моменту, оскільки якщо, не змінюючи ні модуль сили, ні її напрям, перенести вісь обертання з точки O в іншу точку, то зміниться плече сили, а отже, і момент сили.

Момент сили залежить від двох величин: від модуля самої сили і від її плеча. Один і той самий момент сили може бути створений малою силою, а плече якої велике, і великою силою з малим плечем. Якщо, наприклад, намагатися закрити двері, штовхаючи поблизу петель, то цьому з успіхом зможе протидіяти дитина, яка здогадається штовхати їх в інший бік, приклавши силу ближче до краю дверей, отже, тоді вони залишаться в стані спокою (мал. 113).



Мал. 113

Для нової величини — моменту сили — потрібно, звичайно, вибрати одиницю. З виразу $M = Fd$ випливає, що за одиницю обертового моменту в СІ вважають **момент сили в 1 Н**, лінія дії якої знаходиться від осі обертання на відстані 1 м. Цю одиницю називають **ньютон-метром (Н·м)**.

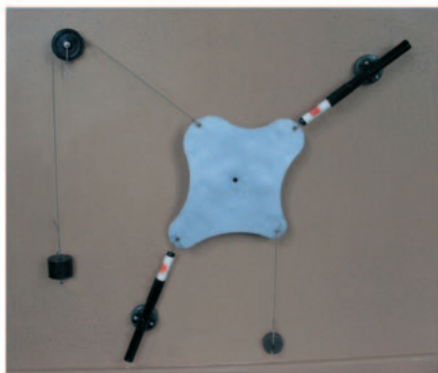
Моментам сил, що обертають тіло проти годинникової стрілки, прийнято приписувати знак «мінус», за годинниковою стрілкою — «плюс». Тоді моменти сил \vec{F}_1 і \vec{F}_2 відносно осі O (мал. 111) мають протилежні знаки і їх алгебраїчна сума дорівнює нулю. Таким чином, ми можемо записати умову рівноваги тіла із закріпленою віссю обертання:

$$\begin{aligned} F_1 d_1 = F_2 d_2 \quad \text{або} \quad F_1 d_1 - F_2 d_2 = 0; \\ M_1 = M_2, \quad \text{або} \quad M_1 - M_2 = 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

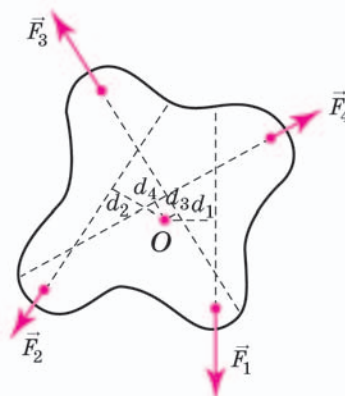
Тіло, здатне обертатися навколо закріпленої осі, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю.

У цьому полягає **правило моментів**, воно і слугує умовою рівноваги тіла із закріпленою віссю обертання.

Правило моментів отримане нами для випадку, коли на тіло діють дві сили. Можна показати, що це правило виконується і в тих випадках, коли на тіло діє кілька сил.

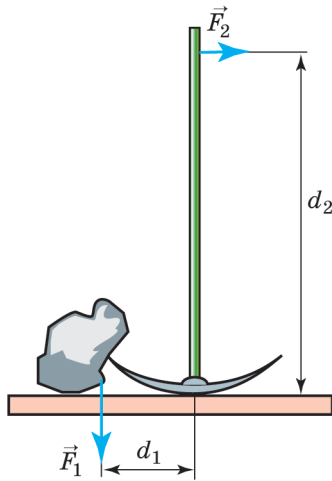


а



б

Мал. 114



Мал. 115

Пояснимо це на досліді, який проводиться з приладом, зображеним на мал. 114, а. Тіло неправильної форми закріплене на осі (вісь обертання). До чотирьох точок цього тіла прикладені сили. Дві з них за модулем дорівнюють вагам відповідних вантажів, показаних на мал. 114, а. Дві інші — це сили пружності, з якими розтягнуті пружини динамометрів діють на тіло. Модулі цих сил фіксуються на шкалах динамометрів. Під дією цих чотирьох сил тіло перебуває в рівновазі. За допомогою циркуля і лінійки можна виміряти плечі цих сил. При цьому можна переконатися в тому, що алгебраїчна сума моментів усіх чотирьох сил відносно осі обертання дорівнює нулю.

На мал. 114, б показана схема цього досліді, де на тіло діють чотири сили: F_1 , F_2 , F_3 і F_4 . Закріплена вісь проходить через точку O .

З малюнка видно, що моменти сил F_1 і F_4 відносно осі обертання тіла додатні, а моменти сил F_2 і F_3 — від'ємні.

Тоді умова рівноваги тіла записується у вигляді:

$$F_1 d_1 - F_2 d_2 - F_3 d_3 + F_4 d_4 = 0, \quad (2.30)$$

де d_1 , d_2 , d_3 і d_4 — плечі відповідних сил.

Тепер сформулюємо загальну умову рівноваги тіла.

Для того щоб тіло знаходилося в рівновазі, необхідно, щоб геометрична сума прикладених до тіла сил і сума моментів цих сил відносно осі обертання дорівнювала нулю.

Легко побачити, що з правила моментів впливає знамените **правило важеля**:

важіль знаходиться в рівновазі, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні до плечей.

Проте це ніщо інше, як друге формулювання правила моментів! Адже з формули випливає, що

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}. \quad (2.31)$$

На мал. 115 показано важіль, до якого прикладені взаємно перпендикулярні сили F_1 і F_2 .

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. За яких умов сила, прикладена до тіла, викликає його поворот навколо закріпленої осі?
2. Що таке плече сили?
3. Що таке момент сили? Яка його одиниця в СІ?
4. У чому полягає умова рівноваги тіла, яке може обертатися навколо закріпленої осі?
5. За яких умов важіль перебуває в рівновазі (мал. 115)?

§ 32 ВИДИ РІВНОВАГИ ТІЛ

Якщо тіло перебуває в рівновазі, то це означає, що сума прикладених до нього сил дорівнює нулю і сума моментів цих сил відносно осі обертання також дорівнює нулю. Проте виникає запитання: *а чи стійка ця рівновага?*

З першого погляду видно, наприклад, що положення рівноваги кульки на вершині вигнутої підставки (мал. 116) нестійке: щонайменше відхилення кульки від рівноважного положення приведе до того, що вона скотиться вниз. Розглянемо ту саму кульку, поміщену на вгнутій підставці (мал. 117). Її не так просто змусити залишити своє місце. Рівновагу кульки в цьому випадку можна вважати стійкою.

У чому секрет стійкості? У розглянутих нами випадках кулька перебуває в рівновазі: сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ дорівнює за модулем протилежно напрямленій силі реакції опори \vec{N} з боку опори (мал. 116, 117).

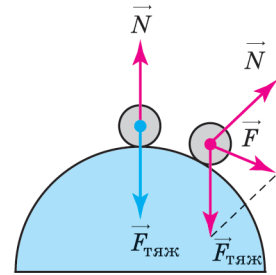
Виявляється, що причина, через яку кулька втрачає стійкість, — це найменше відхилення тіла від положення рівноваги. На мал. 116 видно, що, як тільки кулька на випуклій підставці покинула своє місце, сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ перестає врівноважуватися силою реакції опори \vec{N} (сила \vec{N} , як вам відомо, завжди напрямлена перпендикулярно до стичних поверхонь кульки і підставки). Рівнодійна сил тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ і сили реакції опори \vec{N} , тобто сила \vec{F} , напрямлена так, що кулька ще більше віддаляється від положення рівноваги.

На вгнутій підставці все відбувається інакше (мал. 117). Хоча при найменшому відхиленні від початкового положення також порушується рівновага. Сила реакції опори \vec{N} не врівноважує силу тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$, а рівнодійна \vec{F} напрямлена вже так, що тіло повертається у початкове положення. У цьому й полягає умова стійкості рівноваги тіла.

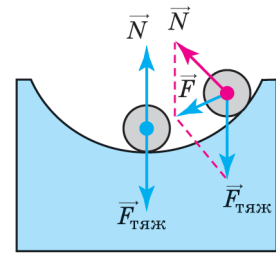
Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від рівноважного положення рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги.

Рівновага нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.

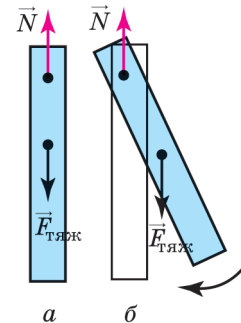
Це справедливо і для тіла, що має вісь обертання. Як приклад такого тіла розглянемо звичайну лінійку, закріплену на стержні, що проходить через отвір по-



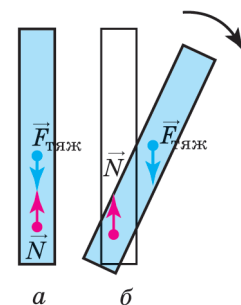
Мал. 116



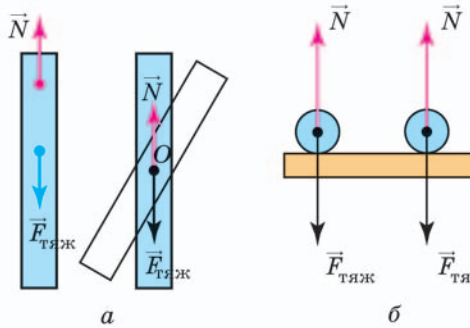
Мал. 117



Мал. 118



Мал. 119



Мал. 120

близу її кінця. Положення лінійки, показане на мал. 118, *a*, *б*, є стійким. Підвісити ту саму лінійку на стержні так, як це показано на мал. 119, *a*, неможливо. При відхиленні від вертикального положення (мал. 119, *б*) лінійка повернеться так, щоб зайняти положення, показане на малюнку 119. Отже, рівновага лінійки, зображена на мал. 119, *a*, нестійка.

Стійке і нестійке положення рівноваги відрізняються одне від одного ще й положенням центра тяжіння тіла.

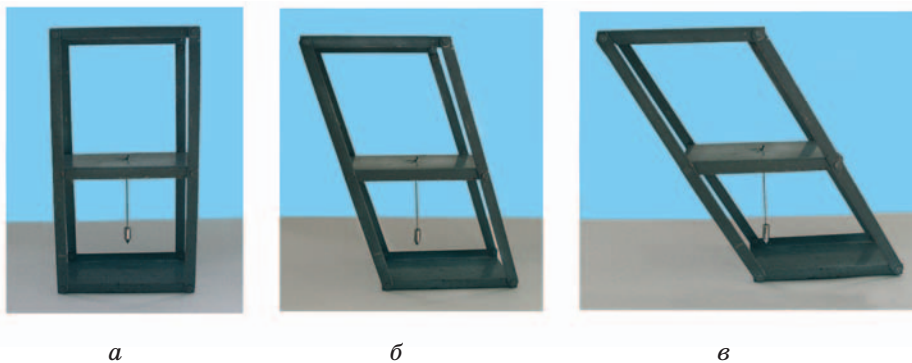
Якщо кулька перебуває в положенні нестійкої рівноваги (мал. 116), то її центр тяжіння вищий, ніж у будь-якому іншому положенні. Навпаки, у кульки на вгнутій опорі центр тяжіння в положенні стійкої рівноваги (мал. 117) нижчий, ніж у будь-якому із сусідніх положень. Отже, для стійкої рівноваги центр тяжіння тіла повинен знаходитися в найнижчому з можливих для нього положень.

Рівновага тіла, що має вісь обертання, стійка за умови, якщо його центр тяжіння розташований нижче за вісь обертання.

Можливе і таке положення рівноваги, коли відхилення від нього не призводять до змін у стані тіла. Такими, наприклад, є положення лінійки, підвешеної на стержні, що проходить крізь отвір в її центрі тяжіння (мал. 120, *a*), кульки на плоскій опорі (мал. 120, *б*). Таку рівновагу називають **байдужою**.

Ми розглянули умову стійкості і нестійкості рівноваги тіл, що мають точку або вісь опори. Не менш важливим є випадок, коли опорою є не точка (вісь), а деяка поверхня. Поверхню опори мають ящик на підлозі, склянка на столі, будівлі, фабричні труби тощо. *Які умови стійкої рівноваги тіл в цьому випадку?*

На тіла, що мають поверхню опори, діють і врівноважують одна одну, як і раніше, сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ і сила реакції з боку опори \vec{N} , перпендикулярна до її поверхні. Як і у вище розглянутих випадках, рівновага буде стійкою, якщо при відхиленні від положення рівноваги не виникає сила,



Мал. 121

що віддаляє тіло від цього положення. Коли, наприклад, призма стоїть на горизонтальній поверхні, вона перебуває в рівновазі. Це рівновага стійка, тому що при нахилі на малий кут лінія дії сили тяжіння призми перетинає підставку призми (мал. 121, а).

Проте, якщо сильніше нахилити призму (мал. 121, б), то лінія дії сили тяжіння також перетинатиме підставку призми. Граничне положення призми, коли вона ще не падає, показано на мал. 121, в.

Таким чином, для стійкості тіла необхідно, щоб вертикаль, проведена через його центр тяжіння, перетинала поверхню опори.

Поверхня опори, від якої залежить рівновага, — це не завжди поверхня, яка дійсно стикається з тілом. Стіл, наприклад, стикається з підлогою тільки там, де знаходяться його ніжки. Проте поверхня опори столу — це поверхня всередині контуру, який вийде, якщо з'єднати прямими лініями всі ніжки столу.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які види рівноваги ви знаєте?
2. Яка рівновага тіла називається стійкою? Нестійкою? Байдужою?
3. Вкажіть види рівноваги для наступних випадків: а) гімнаст робить стійку на брусах; а) гімнаст висить на кільцях; б) колесо надіте на вісь; в) кулька лежить на столі.
4. Яким чином забезпечується хороша стійкість наступних предметів: а) лабораторного штатива; б) баштового підйомального крана; в) настільної лампи?

Лабораторна робота № 3

Дослідження рівноваги тіла під дією кількох сил

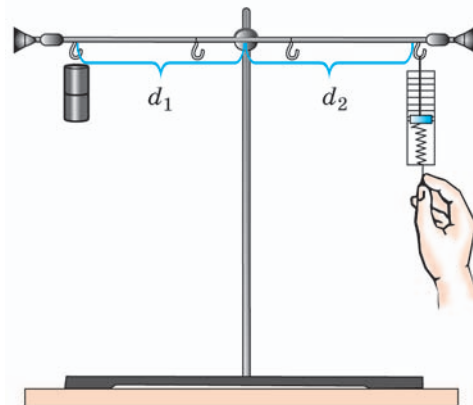
Мета роботи: встановити співвідношення між моментами сил, які прикладені до плечей важеля під час рівноваги.

Для цього до одного з плечей важеля підвішують один або кілька важків, а до іншого прикріплюють динамометр (мал. 122). За допомогою динамометра вимірюють значення сили \vec{F} , яку необхідно прикласти для того, щоб важіль перебував у рівновазі. Потім за допомогою того самого динамометра вимірюють значення сили тяжіння $m\vec{g}$, що діє на важки. Плечі важеля вимірюють за допомогою лінійки з міліметровими поділками. Після цього визначають значення моментів M_1 і M_2 сил $m\vec{g}$ і \vec{F} :

$$M_1 = mgd_1 \text{ і } M_2 = Fd_2.$$

Висновок про похибки експериментальної перевірки правила моментів можна зробити, порівнявши з одиницею співвідношення $\frac{M_1}{M_2}$, враху-

вавши що $\varepsilon_1 = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta d_1}{d_1}$, $\varepsilon_2 = \frac{\Delta F}{F} +$



Мал. 122

$+\frac{\Delta d_2}{d_2}$ і записати результат: $M_1 = M_{\text{вим1}} \pm \Delta M_1$, $M_2 = M_{\text{вим2}} \pm \Delta M_2 \times (\Delta M_1 = \varepsilon_1 M_1; \Delta M_2 = \varepsilon_2 M_2)$.

Прилади і матеріали: важіль, штатив з муфтою, динамометр, лінійка з міліметровими поділками, набір важків.

Хід роботи

1. Встановіть важіль на штатив і зрівноважте його за допомогою розміщених на його кінцях пересувних гайок так, щоб він перебував у горизонтальному положенні.

2. Підвісьте в деякій точці одного з плечей важеля важки (мал. 122).

3. Прикріпіть до іншого плеча важеля динамометр і визначте силу, яку необхідно прикласти до важеля для того, щоб він перебував у рівновазі. Результат зафіксуйте у таблиці.

4. Виміряйте за допомогою лінійки плечі важеля. Результати запишіть у таблицю.

5. Обчисліть значення моментів сил $m\vec{g}$ і \vec{F} та їх похибки.

6. Зафіксовані обчислені величини занесіть у таблицю.

$d_1, \text{ м}$	$\Delta d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$\Delta d_2, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$\Delta m, \text{ кг}$	$g, \text{ м/с}^2$	$\Delta g, \text{ м/с}^2$	$F, \text{ Н}$	$\Delta F, \text{ Н}$	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\frac{\Delta M_1}{M_1}$	$\frac{\Delta M_2}{M_2}$	$\frac{M_1}{M_2}$

7. Порівняйте відношення $\frac{M_1}{M_2}$ з одиницею і зробіть висновок про похибки експериментальної перевірки правила моментів.

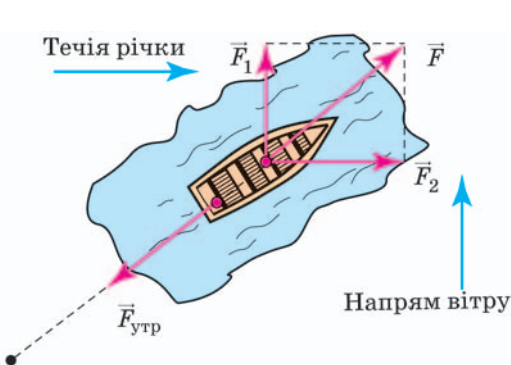
Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Як утримати в рівновазі човен, на який діють течія річки і вітер, що дме з берега?

Розв'язання.

Знайдемо рівнодійну \vec{F} сил \vec{F}_1 і \vec{F}_2 , викликаних вітром і течією річки. Для цього скористаємося правилом паралелограма. Діагональ паралелограма дає нам модуль і напрям



рівнодійної \vec{F} . Для того щоб човен був у рівновазі, до нього повинна бути прикладена сила $\vec{F}_{\text{утр}}$, яка дорівнює рівнодійній за модулем, але напрямлена в протилежну сторону. Такою силою, наприклад, може бути сила пружності троса, прикріпленого одним кінцем до носа човна, а іншим до берега.

Якщо, наприклад, сила, з якою течія діє на човен, дорівнює 150 Н, а

сила вітру дорівнює 100 Н, то рівнодійна цих двох взаємно перпендикулярних сил може бути обчислена за теоремою Піфагора:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}; F = \sqrt{(100 \text{ Н})^2 + (150 \text{ Н})^2} \approx 180 \text{ Н}.$$

В і д п о в і д ь: човен може бути утриманий тросом, здатним витримати натяг не менший за 180 Н.

2. Вантаж масою 10 кг висить на двох неростяжних тросах, кут між якими становить $2\varphi = 120^\circ$. Визначте натяг тросів.

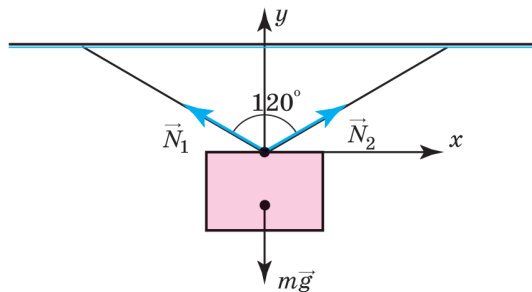
Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$2\varphi = 120^\circ$$

$$N_1 = ? \quad N_2 = ?$$

Р о з в' я з а н н я
Виконаємо малюнок.



Запишемо умову рівноваги тіла на тросах: $\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + m\vec{g} = 0$.

Знайдемо проекції сил на координатні осі:

$$Ox: N_1 \sin \varphi - N_2 \sin \varphi = 0,$$

$$Oy: N_1 \cos \varphi + N_2 \cos \varphi - mg = 0.$$

Знаючи, що $N_1 = N_2$, отримаємо $2N_1 \cos \varphi = mg$, звідки $N_1 = N_2 = \frac{mg}{2 \cos \varphi}$.

Підставивши значення відомих величин, визначимо

$$N_1 = N_2 = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{2 \cdot 0,5} = 100 \text{ Н}.$$

Отже, сили натягу тросів дорівнюють 100 Н.

В і д п о в і д ь: $N_1 = N_2 = 100 \text{ Н}$.

Рівень А

196. На двох тросах однакової довжини підвішений вантаж масою 50 кг. Кут між тросами дорівнює 60° . Визначте сили натягу тросів.
197. На аеростат у горизонтальному напрямі діє вітер із силою 1000 Н. Натяг троса дорівнює 2000 Н. На який кут від вертикалі відхилиться трос і який його натяг у безвітряну погоду?
198. До середини троса довжиною 20 м підвішений світильник масою 3,4 кг, унаслідок чого трос провис на 5 см. Визначте сили пружності, що виникли в тросі.
199. Довга жердина, яку поставлено вертикально, перебуває у стані нестійкої рівноваги. Як її утримує жонглер? Зробіть аналогічний дослід самостійно з якою-небудь рейкою або лінійкою.

200. У якому стані й чому яйце перебуватиме в стійкій рівновазі на столі?
 201. Чому човен стає менш стійким, коли той, хто сидить у ньому, встане?

Рівень В

202. На цвях, забитий у стіну перпендикулярно до неї, діє сила 200 Н під кутом 30° до стіни. Визначте складові цієї сили, з яких одна вириває цвях, а друга його згинає.
203. Вантаж переміщують по горизонтальній площині зі сталюю швидкістю двома канатами, до яких прикладають сили по 500 Н. Канати утворюють між собою кут 60° . Визначити силу тертя об площину. При якій силі тертя кут між канатами довелось б зробити рівним 0° ; 90° ; 120° ?
204. Ліхтар масою 10 кг підвішено в середині каната, протягнутого поперек вулиці, ширина якої 10 м. Точка прикріплення ліхтаря до каната міститься на висоті 5 м. Допустимий натяг каната 500 Н. Визначте висоту кріплення кінців каната, якщо вони знаходяться на одному рівні.
205. На похилій площині лежить дерев'яний брусок. Щоб цей брусок не ковзав по площині, а перебував у рівновазі, до нього прикладено силу, що утворює з площиною кут 90° . Яке мінімальне значення цієї сили? Маса бруска 2 кг, довжина похилої площини дорівнює 1 м, висота — 60 см. Коефіцієнт тертя бруска по похилій площині — 0,4.
206. Маса трамбувального катка 100 кг, радіус 50 см. Яку мінімальну горизонтальну силу треба прикласти до катка, щоб перекотити його через балку заввишки 10 см?
207. Що стійкіше: циліндр чи конус, коли вони мають однакову масу, висоту і площу основи?

§ 33 ІМПУЛЬС ТІЛА

Ви вже ознайомилися, як за допомогою законів Ньютона можна розв'язувати задачі про рух тіл. Тому може скластися таке враження, що на цьому ми могли б і закінчити вивчення механіки. Проте у багатьох випадках визначити значення сил, що діють на тіло, дуже важко. Коли ми розглядаємо зіткнення двох тіл, наприклад двох вагонів, ми знаємо, що при цьому вони взаємодіють один з одним силою пружності. Але визначити значення цієї сили буває важко, а іноді неможливо через те, що деформації стичних частин вагонів дуже складні. Навіть у випадку простого зіткнення двох куль деформація кожної з них має складний вигляд, і незрозуміло, яких значень набудуть величини x і k формули закону Гука: $(F_{\text{пр}})_x = -kx$ ($F_{\text{пр}} = -k\Delta l$).

У таких випадках для розв'язання задач механіки застосовують прості наслідки із законів руху, які є видозмінами другого закону Ньютона. Проте при цьому замість сил і прискорень з'являються нові величини. Ці нові величини — **імпульс** і **енергія**. Імпульс і енергія — особливі величини, вони мають властивість **збереження**. І саме ці величини та їх властивість збереження відіграють важливу роль не тільки в механіці, а і в інших розділах фізики. У цьому і полягає їх особливість.

Запишемо формулу для другого закону Ньютона по-іншому: $\vec{F} = m\vec{a}$. Для цього пригадаємо, що прискорення дорівнює темпу зміни швидкості тіла. Зокрема, для рівноприскореного руху: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.

Врахувавши цей вираз, маємо

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

Останню формулу запишемо у такому вигляді:

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (2.32)$$

Отримана формула є іншим виразом другого закону Ньютона. Права частина цієї рівності є зміною добутку маси тіла і швидкості його руху. Добуток маси тіла і швидкості його руху — це фізична величина, що має особливу назву. Її називають **імпульсом** тіла або **кількістю руху** тіла, позначають літерою p .

Імпульсом тіла або **кількістю руху тіла** називають добуток маси тіла і швидкості його руху.

Імпульс тіла — векторна величина. Напрямок імпульсу збігається з напрямком швидкості.

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.33)$$

Прийнято говорити, що тіло масою m , яке рухається зі швидкістю \vec{v} , несе з собою імпульс $m\vec{v}$ (або має імпульс $m\vec{v}$).

Очевидно, що за одиницю імпульсу в СІ треба взяти імпульс тіла масою 1 кг, яке рухається зі швидкістю 1 м/с. Одиницею імпульсу є **кілограм-метр за секунду (кг · м/с)**.

Зміна імпульсу тіла дорівнює, як видно з формули $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$, добутку сили \vec{F} і часу її дії t . Величина $\vec{F}t$ також має особливу назву. Її називають **імпульсом сили**.

Зміна імпульсу (кількості руху) тіла дорівнює імпульсу сили.

При виведенні формули $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ ми припускали, що прискорення тіла, а отже, і сила, що діє на тіло, не змінюються у часі. Якщо сила змінюється з часом, то інтервал часу, протягом якого діє сила, можна розділити на маленькі інтервали, під час яких силу можна вважати сталою. Для визначення зміни імпульсу протягом кожного такого інтервалу часу можна скористатися формулою $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$. Додавши отримані зміни імпульсу тіла, ми одержимо зміну імпульсу за весь інтервал часу, протягом якого діяла сила.

Якщо час, протягом якого діяла сила, дуже малий, як, наприклад, при зіткненні тіл або під час удару, то можна і безпосередньо скористатися формулою $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$, розуміючи під \vec{F} середню силу, що діє на тіло.

Імпульс цікавий тим, що він змінюється під дією даної сили однаково в усіх тіл, якщо час дії сили однаковий. Одна і та сама сила, що діє протягом певного часу, надасть однакового імпульсу і навантаженій баржі, і легенькій байдарці.

? ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке імпульс? Чому дорівнює модуль імпульсу тіла? Як напрямлений імпульс тіла?
2. Як пов'язані сила, прикладена до тіла, і його імпульс? Чи можна сказати, що тіло має імпульс, тому що на нього діє сила?
3. Що таке імпульс сили? Як він напрямлений і чому дорівнює його модуль?
4. Який зв'язок між імпульсом сили і імпульсом тіла?
5. Назвіть одиниці імпульсу сили і імпульсу тіла. Чи різні ці одиниці?

§ 34 ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ. РЕАКТИВНИЙ РУХ

Імпульс має дуже цікаву і важливу властивість, яка є у небагатьох фізичних величин. Це **властивість збереження**. Вона полягає в тому, що геометрична сума імпульсів тіл, що взаємодіють тільки одне з одним, зберігається незмінною. Самі імпульси тіл, звичайно, змінюються, оскільки на кожне з тіл діють сили взаємодії, але сума імпульсів залишається незмінною (сталою). Це твердження називається **законом збереження імпульсу**. Закон збереження імпульсу — один із найважливіших законів природи. Дуже просто цей закон доводиться при взаємодії двох тіл. Дійсно, якщо перше тіло діє на друге із силою \vec{F} , то друге тіло діє на перше із силою, яка за третім законом Ньютона дорівнює $-\vec{F}$. Позначимо маси тіл m_1 і m_2 , а їх швидкості руху відносно якоїсь системи відліку \vec{v}_1 і \vec{v}_2 . Внаслідок взаємодії тіл їх швидкості через деякий час t зміняться і будуть дорівнювати \vec{v}'_1 і \vec{v}'_2 . Тоді, за формулою $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ запишемо

$$\vec{F}t = m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1, \quad -\vec{F}t = m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2.$$

Таким чином, $m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_2 = -(m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2)$.

Змінивши знаки обох частин цієї рівності на протилежні, перепишемо її у вигляді

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2. \quad (2.34)$$

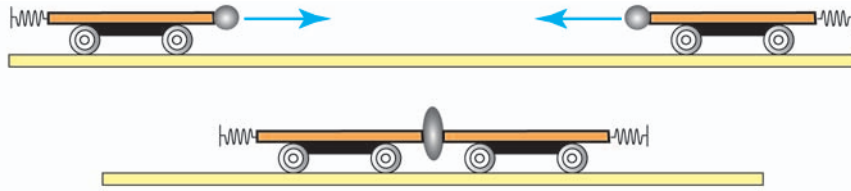
У лівій частині цієї рівності знаходиться сума початкових імпульсів двох тіл, а в правій — сума імпульсів тих же тіл через час t . Ці суми дорівнюють одна одній. Отже, хоча імпульс кожного з тіл при взаємодії змінюється, їх повний імпульс, тобто сума імпульсів обох тіл, зберігається незмінною. Що і потрібно було довести.

Цей закон також можна довести, і досліди це підтверджують, для взаємодії не двох, а багатьох тіл. І в цьому разі геометрична сума імпульсів усіх тіл, або системи тіл, залишається незмінною. Важливо тільки, щоб ці тіла взаємодіяли одне з одним і на них не діяли сили з боку інших тіл, що не входять до системи (або щоб ці зовнішні сили рівноважувалися). Таку групу тіл, які не взаємодіють ні з якими іншими тілами, що не входять до цієї групи, називають **замкнутою системою**.

Саме для замкнутих систем і справедливий закон збереження імпульсу.

Геометрична сума імпульсів тіл, що є складовими замкнутої системи, залишається сталою при будь-яких взаємодіях тіл цієї системи між собою.

Звідси випливає, що взаємодія тіл зводиться до того, що одні тіла передають частину свого імпульсу іншим.



Мал. 123

Імпульс тіла — це векторна величина. Отже, якщо сума імпульсів тіл зберігається сталою, то і сума проєкцій цих імпульсів на координатні осі також залишається сталою. Внаслідок цього геометричне додавання імпульсів можна замінити алгебраїчним додаванням їх проєкцій.

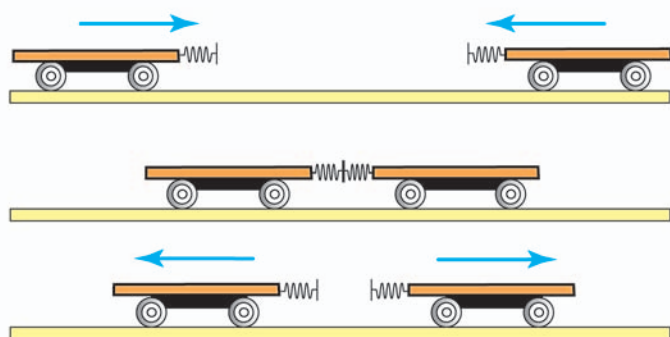
Закон збереження імпульсу можна проілюструвати такими простими дослідами.

1. Поставимо на рейки два візки однакової маси m . До торця одного візка прикріпимо пластилінову кульку. Нехай візки рухаються назустріч один одному з однаковими за модулем швидкостями \vec{v} (мал. 123). При зіткненні обидва візки зупиняться. Пояснити результати досліду легко. До зіткнення імпульс лівого візка дорівнює $m\vec{v}$, а правого візка $-m\vec{v}$ (візки рухалися з протилежно напрямленими швидкостями). Отже, до моменту зустрічі візків їх загальний імпульс дорівнював нулю: $m\vec{v} + (-m\vec{v}) = 0$. Після зіткнення візки зупинилися. І тепер сумарний імпульс обох візків дорівнює нулю.

2. Можна повернути візки так, щоб вони були повернуті один до одного пружинними буферами (мал. 124). Тоді, повторивши дослід, переконаємося в тому, що після зіткнення обидва візки роз'їдуться в протилежні сторони. При цій взаємодії швидкості руху візків змінять свої напрями на протилежні, модулі ж швидкостей залишаться такими самими, якими вони були до взаємодії. Якщо до зустрічі імпульс лівого візка дорівнював $m\vec{v}$, а правого $-m\vec{v}$, то після зустрічі імпульс лівого візка буде дорівнювати $-m\vec{v}$, а правого — $m\vec{v}$. Тому сумарний імпульс обох візків дорівнює нулю як до, так і після зіткнення, як цього і вимагає закон збереження імпульсу.

Цікавий і важливий випадок практичного використання закону збереження імпульсу — це **реактивний рух**. Так називають рух тіла, який виникає при відділенні від тіла з певною швидкістю деякої його частини.

Реактивний рух здійснюють, наприклад, ракети. Будь-яка ракета — це



Мал. 124



Мал. 125

система двох тіл. Вона складається з оболонки і пального, яке в ній міститься. Оболонка має форму труби, один кінець якої закритий, а інший відкритий і забезпечений трубчастою насадкою з отвором особливої форми — реактивним соплом.

Пальне при запуску ракети спалюється і перетворюється на газ високого тиску і високої температури. Внаслідок високого тиску цей газ з великою швидкістю виривається з сопла ракети. Оболонка ракети рухається при цьому в протилежну сторону (мал. 125).

Перед стартом ракети її загальний імпульс (оболонки і пального) в системі координат, пов'язаній із Землею, дорівнює нулю, ракета не рухається відносно Землі. Внаслідок взаємодії газу і оболонки, яка викидає газ, ракета набуває певного імпульсу. Вважатимемо, що сила тяжіння практично не впливає на рух, тому оболонку і пальне можна розглядати як замкнуту систему, і їх загальний імпульс повинен і після запуску залишатися рівним нулю. Оболонка, у свою чергу, завдяки взаємодії з газом набуває імпульсу, що за модулем дорівнює імпульсу газу, але протилежного за напрямом. Ось чому рухатися починає не тільки газ, а й оболонка ракети, у якій можуть бути розміщені наукові прилади для досліджень, засоби зв'язку. У ракеті може знаходитися космічний корабель з космонавтами або астронавтами.

Закон збереження імпульсу дає змогу визначити швидкість руху ракети (оболонки).

Дійсно, припустимо спочатку, що весь газ, який утворюється при згорянні пального, викидається з ракети одразу, а не витікає поступово. Позначимо всю масу газу, на який перетворюється пальне в ракеті, m_r , швидкість газу \vec{v}_r . Масу і швидкість руху оболонки — $m_{об}$ і $\vec{v}_{об}$. Згідно із законом збереження імпульсу сума імпульсів оболонки і газу після запуску повинна бути такою самою, якою була до запуску ракети, тобто повинна дорівнювати нулю. Отже,

$$m_r(v_r)_y + m_{об}(v_{об})_y = 0, \text{ або } m_{об}v_{об} = m_r v_r \quad (2.35)$$

(координатна вісь Oy вибрана у напрямі руху оболонки). Звідси визначимо швидкість руху оболонки:

$$v_{об} = \frac{m_r}{m_{об}} v_r. \quad (2.36)$$

З формули (2.36) видно, що швидкість руху оболонки ракети тим більша, чим більша швидкість витікання газу і чим більше відношення маси пального до маси оболонки. Тому досить велику швидкість оболонка отримує в тому випадку, якщо маса пального буде набагато більша, ніж маса оболонки. Наприклад, для того щоб швидкість руху оболонки була за абсолютним значенням у 4 рази більша за швидкість витікання газу, потрібно, щоб маса пального була у стільки ж разів більша за масу оболонки, тобто оболонка повинна становити одну п'яту всієї маси ракети на старті. Адже «корисна» частина ракети — це сама оболонка.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає закон збереження імпульсу?
2. Що таке замкнута система тіл?
3. Парусний човен потрапив у штиль і зупинився. Чи можна змусити його рухатися, надуваючи вітрила за допомогою насосів, встановлених на її борту?
4. З рухомого танка робиться гарматний постріл. Чи вплине постріл на швидкість руху танка? Які тіла утворюють у даному випадку замкнуту систему?
5. Дві кульки однакової маси котяться назустріч одна одній з однаковими за модулем швидкостями по гладенькій поверхні (обидві кульки утворюють замкнуту систему). Кульки стикаються і після зіткнення рухаються в протилежних напрямках з такими самими за модулем швидкостями. Чому дорівнює їх загальний імпульс до зіткнення, у момент зіткнення і після нього?
6. Чи можуть осколки гранати, що вибухнула, летіти в одному напрямі, якщо до вибуху граната перебувала у стані спокою? А якщо рухалася?
7. Ракета, як відомо, може отримати прискорення у космічному просторі, де навколо неї немає ніяких тіл. Крім того, для її прискорення потрібна сила, а сила — це дія одного тіла на інше. Чому прискорюється ракета?
8. Від чого залежить швидкість руху ракети?

Задачі та вправи

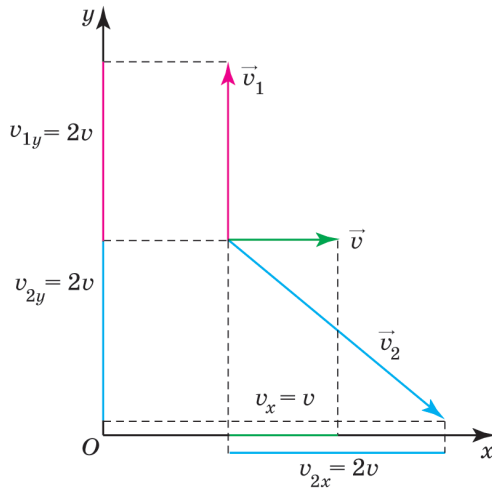
Під час розв'язування задач використовуйте алгоритм застосування закону збереження імпульсу, який містить у собі такі етапи:

1. Встановіть, чи є система тіл замкнутою. Якщо в системі відбувається швидка зміна імпульсів (вибух, удар), то тривалість взаємодії вважається нескінченно малою. Тому не враховується дія сили тяжіння і сили опору.
2. Зобразіть на малюнку вектори імпульсів тіл до і після взаємодії.
3. Запишіть геометричну суму імпульсів для кожного тіла до взаємодії і після.
4. Запишіть закон збереження імпульсу для заданих тіл у векторній формі.
5. Виберіть систему відліку і визначте проекції імпульсів тіл на координатні осі.
6. Запишіть закон збереження імпульсу для даного випадку в скалярній формі (у проекціях на вибрані осі координат).
7. Запишіть додаткові формули кінематики, якщо невідомих величин більше, ніж рівнянь.
8. Розв'яжіть систему рівнянь щодо шуканих величин.
9. Перевірте правильність розв'язку.

Розв'язуємо разом

Розглянемо приклади розв'язування задач:

1. Снаряд розірвався у верхній точці траєкторії на два уламки однакової маси. Швидкість руху снаряда безпосередньо перед вибухом була \vec{v} , а швидкість руху одного з уламків відразу ж після вибуху $\vec{v}_1 = 2\vec{v}$ і напрямлена вертикально вгору. Обчисліть значення і напрям швидкості \vec{v}_2 другого уламка в момент вибуху.



Тоді $v_2 = \sqrt{v_{2x}^2 + v_{2y}^2} = 2v\sqrt{2}$; $\operatorname{tg}\alpha = 1$, $\alpha = 45^\circ$.

В і д п о в і д ь: другий уламок полетить із швидкістю $v_2 \approx 2,8v$ вниз під кутом $\alpha = 45^\circ$ до горизонту.

2. Хлопчик масою 50 кг рухається до носа човна масою 150 кг зі швидкістю 0,6 м/с відносно човна. З якими швидкостями рухаються при цьому човен і хлопчик відносно води? Опором води знехтувати.

Д а н о:

$$\begin{aligned} m_1 &= 50 \text{ кг} \\ m_2 &= 150 \text{ кг} \\ u &= 0,6 \text{ м/с} \\ v_1 &=? \quad v_2=? \end{aligned}$$

Р о з в' я з а н н я

Оскільки рівнодійна сил тяжіння та архімедової сили, що діють на човен, дорівнює нулю, система тіл «човен—хлопчик» є замкнутою. Силою опору води, що виникає при русі човна, знехтуємо, оскільки при малих швидкостях ця сила мала. Застосуємо для цієї системи тіл закон збереження імпульсу відносно системи відліку, пов'язаної з нерухою водою. Імпульс системи до початку руху хлопчика дорівнює нулю.

За додатний напрям осі Ox виберемо напрям руху човна. Відносно води проекція імпульсу човна на вісь Ox дорівнює m_2v_2 , а імпульсу хлопчика $-m_1v_1$, де v_1 і v_2 — відповідно швидкості руху хлопчика і човна відносно води. Із закону додавання швидкостей випливає, що $v_1 = u - v_2$.

Запишемо тепер закон збереження імпульсу:

$$m_2v_2 - m_1(u - v_2) = 0.$$

Звідси швидкості човна і хлопчика відносно води мають вигляд

$$v_2 = \frac{m_1u}{m_1+m_2}, \quad v_2 = \frac{50 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ м/с}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,15 \text{ м/с};$$

$$v_1 = u - v_2 = u - \frac{m_1u}{m_1+m_2} = \frac{m_2u}{m_1+m_2}, \quad v_1 = \frac{150 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ м/с}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,45 \text{ м/с}.$$

В і д п о в і д ь: швидкість руху човна дорівнює 0,15 м/с, а швидкість руху хлопчика — 0,45 м/с.

Рівень А

208. Визначте імпульс тіла масою 5 кг, що рухається зі швидкістю 2 м/с.
209. У цистерні поливальної автомашини масою 4 т міститься 2 м³ води. Чому дорівнює імпульс машини, коли вона рухається: а) зі швидкістю 18 км/год до місця поливу; б) зі швидкістю 54 км/год, витративши всю воду?
210. Залізничний вагон масою 30 000 кг, що рухається зі швидкістю 1,5 м/с, зчіплюється з нерухомим вагоном, маса якого дорівнює 20 000 кг. Яка швидкість руху вагонів після зчеплення? (Вагони знаходяться на прямолінійній ділянці шляху.)
211. При формуванні залізничного складу три зчеплених між собою вагони, що рухаються зі швидкостями 0,4 м/с, стикаються з нерухомим вагоном, після чого всі вагони продовжують рухатися в ту саму сторону з однаковою швидкістю. Визначте цю швидкість, якщо маси всіх вагонів однакові.
212. Людина масою 70 кг, яка біжить зі швидкістю 7 м/с, наздоганяє візок масою 30 кг, що рухається зі швидкістю 2 м/с, і стрибає на нього. З якою швидкістю почне рухатися візок після цього?
213. Куля масою 10 г пробила стіну і внаслідок цього швидкість її зменшилась від 800 м/с до 300 м/с. Визначте, на скільки зменшився імпульс кулі.
214. Людина масою 50 кг біжить зі швидкістю 10 м/с за візком, який рухається зі швидкістю 5 км/год і стрибає на нього. Якою буде швидкість візка після цього, якщо його маса 80 кг?
215. Снаряд масою m_1 , що летів зі швидкістю v_1 паралельно рейкам, потрапляє в нерухому платформу з піском масою m_2 і застрягає в піску. З якою швидкістю почне рухатись платформа?

Рівень В

216. Металева кулька масою 20 г, що падає зі швидкістю 5 м/с, ударяється пружно об сталеву плиту і відскакує від неї в протилежному напрямі з такою самою за модулем швидкістю. Визначте зміну імпульсу кульки, середню силу, що викликала цю зміну, якщо зіткнення тривало 0,1 с.
217. Шофер вимкнув двигун автомобіля при швидкості 72 км/год. Через 3,4 с автомобіль зупинився. Сила тертя коліс по асфальту дорівнює 5880 Н. Чому дорівнював імпульс автомобіля у момент вимкнення двигуна? Яка маса автомобіля?
218. Автомобіль масою 2 т рухається зі швидкістю 36 км/год. Який час потрібний для повної зупинки автомобіля, після вимкнення двигуна, якщо сила тертя коліс об дорогу дорівнює 5880 Н?
219. Зенітний снаряд, випущений у вертикальному напрямі, досягнувши максимальної висоти, вибухнув. При цьому утворилися три уламки. Два уламки розлетілися під прямим кутом один до одного, причому швидкість першого уламка масою 9 кг дорівнює 60 м/с, а швидкість другого масою 18 кг дорівнює 40 м/с. Третій уламок відлетів зі швидкістю 200 м/с. Визначте графічно напрям польоту третього уламка. Яка його маса?

220. З якою швидкістю має летіти хокейна шайба масою 160 г, щоб її імпульс дорівнював імпульсу кулі масою 8 г, яка летить зі швидкістю 600 м/с?
221. Граната масою 3 кг, що летить горизонтально зі швидкістю 15 м/с, розірвалася на два уламки. Швидкість уламка масою 2 кг зросла в напрямі руху до 25 м/с. Визначте швидкість меншого уламка.
222. Ракета масою $4 \cdot 10^3$ кг летить зі швидкістю 0,5 км/с. Від неї відокремлюється головна частина масою 10^3 кг і летить зі швидкістю 800 м/с. З якою швидкістю продовжуватиме політ частина ракети, що залишилася?
223. Криголам масою 5000 т рухався з вимкненими двигунами зі швидкістю 10 м/с. Після зіткнення з нерухомою крижиною криголам став рухатися разом із нею зі швидкістю 2 м/с. Обчислити масу крижини. Опір води не враховувати.
224. З човна масою 200 кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с, у горизонтальному напрямі стрибає хлопчик масою 50 кг зі швидкістю 3 м/с. Яка швидкість човна після стрибка хлопчика, якщо він стрибає з носа човна по ходу руху? Чи можна вважати такий стрибок безпечним?

§ 35 МЕХАНІЧНА ЕНЕРГІЯ. КІНЕТИЧНА І ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ

Повсякденний досвід показує, що нерухомі тіла можна привести в рух, а рухомі зупинити. *Але чи зникає механічний рух тіл безслідно? Чи почне рухатися яке-небудь тіло без зміни руху інших тіл?*

Наприклад, ударимо молотком по шматку пластиліну. Внаслідок удару механічний рух молотка припиняється. Вимірявши температуру пластиліну чутливим термометром, ми виявимо, що він став теплішим. Механічний рух тіл внаслідок взаємодії перетворився на тепловий рух їх атомів.

Можливе і виникнення механічного поступального руху тіл через зміни теплового руху атомів і молекул. Такі процеси відбуваються під час пострілу з гармати, старту ракети, роботи двигуна внутрішнього згорання.

Досліди і спостереження показують, що механічний рух тіл ніколи не зникає безслідно, але може перетворюватися на інші форми руху. Разом з тим механічний рух ніколи не виникає безпричинно, без зміни руху інших тіл або без перетворення його на інші форми руху матерії.

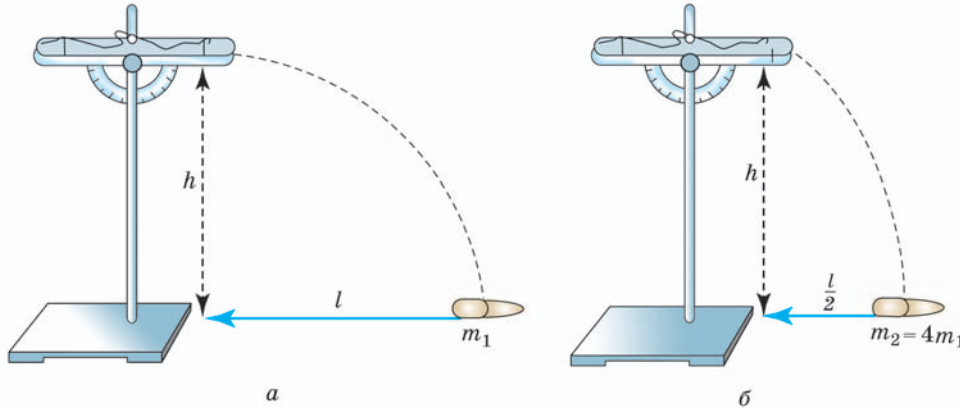
Перед фізиками постало завдання: знайти **фізичну величину, яка є мірою механічного руху і яка зберігається при будь-яких перетвореннях механічного руху в інші форми руху матерії.**

Така фізична величина знайдена. Її називають **енергією**.

Для визначення енергії як фізичної величини потрібно встановити її зв'язок з іншими фізичними величинами, вибрати її одиницю і знайти способи вимірювання.

Що таке енергія тіла, яке рухається поступально?

Енергією поступального руху називають таку механічну величину, яка однакова в усіх тіл, що починають рухатися за рахунок однакової зміни якої-небудь іншої форми руху.



Мал. 126

Можна, наприклад, вивчити результати пострілу з гармати снарядами різної маси при однаковому заряді. Це можна продемонструвати за допомогою дії однаково стисненої сталевий пружини на снаряд балістичного пістолета (мал. 126, а). Дослід показує, що при збільшенні маси снаряда в чотири рази його початкова швидкість руху під дією тієї ж пружини виявляється в два рази меншою (мал. 126, б). Отже, у двох снарядів різних мас у цьому досліді однаковим виявляється добуток маси тіла і квадрат швидкості поступального руху тіла:

$$m_2 = 4m_1, v_2 = \frac{1}{2}v_1, m_2 v_2^2 = 4m_1 \left(\frac{v_1}{2}\right)^2 = m_1 v_1^2. \quad (2.37)$$

Досліди з іншими снарядами показують, що однаково стиснена сталевий пружина надає снарядам різні маси m_1, m_2, \dots, m_n і швидкості v_1, v_2, \dots, v_n , але добуток маси тіла і квадрата швидкості для всіх цих снарядів виявляється однаковим:

$$m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2 = \dots = m_n v_n^2. \quad (2.38)$$

Отже, величина mv^2 може слугувати кількісною мірою поступального руху тіл при взаємних перетвореннях поступального механічного руху з іншими формами руху.

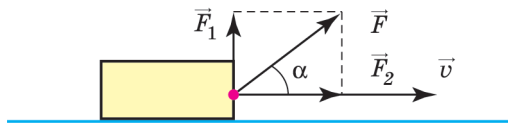
У фізиці як кількісна міра поступального механічного руху при виникненні його з інших форм руху або перетворенні на інші форми руху взята величина, що дорівнює половині добутку маси тіла і квадрата швидкості його руху:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.39)$$

Цю фізичну величину називають **кінетичною енергією тіла**.

Оскільки швидкість руху тіла є величиною, що залежить від вибору системи відліку, значення кінетичної енергії тіла також залежить від вибору системи відліку.

Зміна кінетичної енергії тіла відбувається внаслідок дії на тіло зовнішньої сили \vec{F} .



Мал. 127

Фізичну величину A , що дорівнює зміні кінетичної енергії ΔE_k тіла внаслідок дії на нього сили F , називають **роботою**:

$$A = \Delta E_k. \quad (2.40)$$

Якщо на тіло, що рухається зі швидкістю \vec{v}_1 , діє сила \vec{F} , що збігається за напрямом зі швидкістю, то швидкість руху тіла зростає за час t до деякого значення \vec{v}_2 . При цьому зміна кінетичної енергії

$$\Delta E_k = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m(v_2 - v_1)}{t} \times \frac{(v_2 + v_1)t}{2} = mal = Fl. \quad (2.41)$$

Якщо збігається напрям сили \vec{F} з напрямом швидкості тіла \vec{v} , то робота A дорівнює добутку модуля сили F і шляху l , що пройдений тілом:

$$A = Fl. \quad (2.42)$$

Розглянемо тепер загальний випадок. Нехай на тіло діє сила \vec{F} під кутом α до швидкості руху тіла \vec{v} .

Розкладемо силу \vec{F} на складові \vec{F}_2 і \vec{F}_1 , які напрямлені паралельно напрямку швидкості \vec{v} і перпендикулярно до її напрямку (мал. 127).

Під дією сили \vec{F}_1 , напрямленої перпендикулярно до напрямку швидкості \vec{v} , відбувається зміна тільки напрямку швидкості \vec{v} . Оскільки модуль швидкості не змінюється, не змінюється і кінетична енергія тіла E_k . Отже, зміна кінетичної енергії тіла відбувається тільки під дією складової сили \vec{F}_2 , паралельної напрямку швидкості \vec{v} . У цьому випадку зміна кінетичної енергії визначається виразом $\Delta E_k = F_2 l$.

Значення модуля складової сили \vec{F}_2 дорівнює $F_2 = F \cos \alpha$, а тому зміна кінетичної енергії $\Delta E_k = Fl \cos \alpha$.

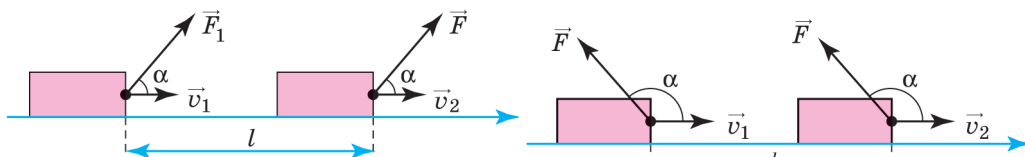
Отже,

$$A = Fl \cos \alpha. \quad (2.43)$$

Якщо сила напрямлена під кутом α до напрямку швидкості руху тіла, то робота дорівнює добутку модуля сили F , шляху l і косинуса кута α між векторами сили \vec{F} і швидкості \vec{v} .

Залежно від значення кута α між векторами сили \vec{F} і швидкості \vec{v} робота може мати додатне або від'ємне значення. Якщо кут α лежить в межах $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$, то робота сили F буде додатна (мал. 128). Внаслідок виконання цієї роботи кінетична енергія тіла збільшується.

Якщо ж кут лежить у межах $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$, то робота сили F буде від'ємна (мал. 129). При виконанні цієї роботи кінетична енергія тіла зменшується.



Мал. 128

Мал. 129

У випадку $\alpha = \frac{\pi}{2}$ робота дорівнює нулю.

Наприклад, сила тяжіння виконує додатну роботу при русі тіла вниз, а при русі тіла вгору робота сили тяжіння від'ємна.

Одним із найпростіших прикладів виникнення кінетичної енергії поступального руху за рахунок перетворення інших видів енергії є вільне падіння тіл.

Якщо тіло масою m піднімають над поверхнею Землі на деяку висоту, а потім воно вільно падає на Землю, то його швидкість збільшується, а кінетична енергія зростає. Збільшення кінетичної енергії тіла при вільному падінні показує, що підняте над Землею тіло має деякий запас енергії. Ця енергія при вільному падінні перетворюється на кінетичну енергію. Це використовується, наприклад, при роботі машини ударної дії (мал. 130).

Із збільшенням висоти, з якої падає тіло, збільшується його швидкість поблизу поверхні Землі, зростає і кінетична енергія. Отже, запас енергії тіла, за рахунок якої зростає кінетична енергія тіла, що вільно падає, збільшується із збільшенням відстані від поверхні Землі.

Енергію, яка залежить тільки від координат тіла або взаємного розміщення тіл, називають **потенціальною енергією** тіла.

Потенціальною енергією піднятого над Землею тіла називають таку фізичну величину E_n , яка при вільному падінні тіла зменшується рівно на стільки, на скільки зростає його кінетична енергія E_k :

$$\Delta E_n = -\Delta E_k. \quad (2.44)$$

Зміна кінетичної енергії тіла ΔE_k у даному випадку дорівнює роботі A сили тяжіння, тому зміна потенціальної енергії тіла дорівнює роботі сили тяжіння, взятої з протилежним знаком:

$$\Delta E_n = -A. \quad (2.45)$$

Зазвичай вважають, що потенціальна енергія тіла дорівнює нулю на поверхні Землі.

При підйомі тіла вертикально вгору на висоту h від поверхні Землі сила тяжіння виконує роботу:

$$A = -mgh, \quad (2.46)$$

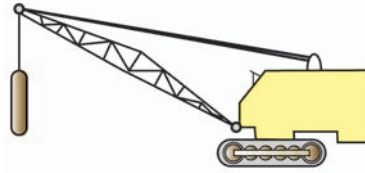
потенціальна енергія при цьому збільшується від нуля до значення mgh .

Потенціальна енергія E_n тіла, що знаходиться на висоті h над поверхнею Землі, дорівнює добутку маси тіла m , прискорення вільного падіння g і відстані h від поверхні Землі (мал.131):

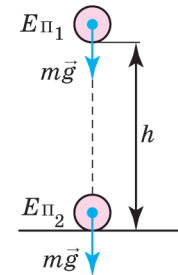
$$E_n = mgh. \quad (2.47)$$

Потенціальна енергія тіла може мати як додатні, так і від'ємні значення. Тіло масою m , що знаходиться на глибині h від поверхні Землі, має від'ємне значення потенціальної енергії (мал. 132):

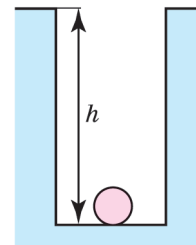
$$E_n = -mgh. \quad (2.48)$$



Мал. 130



Мал. 131



Мал. 132

Кінетична енергія може змінюватися не тільки внаслідок дії на тіло сили тяжіння, а й внаслідок дії сили пружності.

Потенціальною енергією пружно деформованого тіла називають фізичну величину $E_{\text{п}}$, що при зміні швидкості поступального руху тіла під дією сил пружності зменшується рівно на стільки, на скільки зростає кінетична енергія тіла $E_{\text{к}}$:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}. \quad (2.49)$$

З виразів $\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}$ і $A = \Delta E_{\text{к}}$ випливає, що зміна потенціальної енергії $\Delta E_{\text{п}}$ пружно деформованого тіла дорівнює роботі сил пружності A , взятої з протилежним знаком:

$$\Delta E_{\text{п}} = -A. \quad (2.50)$$

При зміні деформації від x_1 до x_2 значення сили пружності за законом Гука лінійно змінюється від $F_1 = -kx_1$ до $F_2 = -kx_2$. При цьому середнє значення сили пружності:

$$F_{\text{сеп}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = -k \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad (2.51)$$

Робота A сили пружності

$$A = F_{\text{сеп}} \Delta x = -k \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) (x_2 - x_1) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}. \quad (2.52)$$

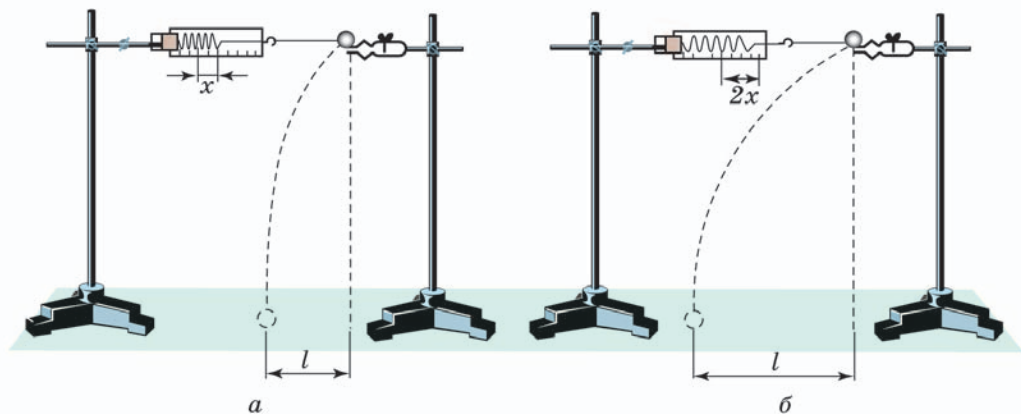
Зміна потенціальної енергії пружини:

$$E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1} = \Delta E_{\text{п}} = -A = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}. \quad (2.53)$$

Потенціальна енергія $E_{\text{п}}$ пружно деформованого тіла дорівнює половині добутку його жорсткості k і квадрата деформації x :

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}. \quad (2.54)$$

У справедливості цього висновку можна переконатися на досліді. Закріпимо горизонтально динамометр із сталеву пружиною, прикріпимо один кінець нитки до гачка динамометра, а до іншого прив'яжемо кулю (мал. 133, а). Розташуємо кулю на одній горизонтальній прямій з пружини-



Мал. 133

ною динамометра і розтягнемо пружину на 2 см, а потім відпустимо кулю. Пружина скорочується, при цьому відбувається перетворення потенціальної енергії пружної деформації на кінетичну енергію поступального руху кулі. Дальність польоту кулі пропорційна проекції її початкової швидкості на горизонтальну вісь (мал. 133 а, б).

Досліди показують, що при збільшенні деформації пружини в 2 рази дальність польоту кулі зростає також в 2 рази (мал. 133, б). Отже, початкова швидкість кулі в другому досліді більша в 2 рази, а кінетична енергія більша в 4 рази. Це доводить, що відповідно до рівняння $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ при збільшенні деформації в 2 рази потенціальна енергія пружно деформованого тіла збільшується в 4 рази.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають кінетичною енергією тіла?
2. Що називають роботою?
3. Як пов'язана робота з силою і пройденим шляхом під час прямолінійного руху?
4. Як пов'язана зміна потенціальної енергії тіла з роботою сили пружності або сили тяжіння?
5. Від чого залежить потенціальна енергія піднятого над Землею тіла?
6. За яких умов можна вважати, що потенціальна енергія піднятого над Землею тіла пропорційна висоті тіла над Землею?
7. Як залежить потенціальна енергія пружно деформованого тіла від деформації?

§ 36 ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ПОВНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Вивчення руху тіл під дією сил тяжіння і сил пружності показало, що існує фізична величина, яку називають потенціальною енергією $E_{\text{п}}$; вона залежна від координат тіла, а зміна її дорівнює зміні кінетичної енергії тіла, взятій з протилежним знаком:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}. \quad (2.55)$$

Отже, сума змін кінетичної і потенціальної енергій тіл, які взаємодіють гравітаційними силами і силами пружності, дорівнює нулю:

$$\Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}} = 0. \quad (2.56)$$

Сили, залежні тільки від координат тіла, називають **консервативними силами**. Сили тяжіння і пружності є **консервативними силами**.

Сума кінетичної і потенціальної енергій тіла є повною механічною енергією:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}. \quad (2.57)$$

Якщо сума змін кінетичної і потенціальної енергій тіл дорівнює нулю, то це означає, що **повна механічна енергія системи тіл, що взаємодіють між собою консервативними силами, залишається сталою**:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}. \quad (2.58)$$

Цей дослідний факт, що підтверджується найточнішими експериментами, називають **законом збереження механічної енергії**. Якщо тіла

взаємодіють силами, які залежать від швидкості відносного руху, механічна енергія в системі взаємодіючих тіл не зберігається. Прикладом сил такого типу, що називаються **неконсервативними силами**, є сили тертя.

Якщо на тіло діють сили тертя, то для їх подолання потрібно затратити енергію, тобто частина її використовується на виконання роботи проти сил тертя.

Проте порушення закону збереження енергії нам тільки здається, тому що цей закон є окремим випадком загального закону збереження і перетворення енергії.

Енергія тіла ніколи не зникає і не з'являється знову: вона лише перетворюється з одного виду на інший.

Загальний закон збереження і перетворення енергії виконується всюди. Внутрішня енергія палива у двигуні внутрішнього згорання перетворюється у механічну енергію поршня. Під час падіння з греблі електростанції потенціальна енергія води перетворюється у кінетичну, яка приводить у рух турбіни і перетворюється в електричну тощо.

Загальний закон збереження енергії застосовується для розв'язання багатьох механічних задач. Він дає змогу розв'язувати їх простіше, ніж за законами Ньютона, і є важливим критерієм багатьох наукових відкриттів і теорій, а також працездатності машин.

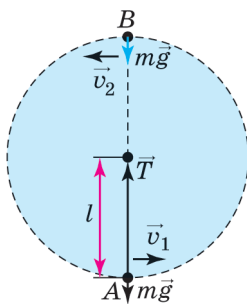
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як пов'язані між собою зміни кінетичної і потенціальної енергій під час взаємодії силами пружності і всесвітнього тяжіння?
2. Що називають повною механічною енергією?
3. Запишіть формулу закону збереження повної механічної енергії. Сформулюйте закон.
4. Чому під час дії сил тертя закон збереження повної механічної енергії порушується?
5. Сформулюйте загальний закон збереження і перетворення енергії.

Задачи та вправи

Розв'язуємо разом

1. Крістіан Гюйгенс стверджував, що якщо куля на невагомій і нерозтяжній нитці обертається у вертикальній площині (мал. 134), то нитка повинна витримувати силу, що дорівнює принаймні збільшеній вшестеро силі тяжіння кулі. Доведіть це твердження.



Мал. 134

Розв'язання.

Позначимо швидкості руху кулі в нижній і верхній точках її траєкторії \vec{v}_1 і \vec{v}_2 .

У системі тіл куля—Земля діє тільки консервативна внутрішня сила тяжіння. Робота зовнішньої сили пружності нитки дорівнює нулю, оскільки кут між векторами \vec{T} і \vec{v} дорівнює 90° . Тому до системи тіл куля—Земля застосуємо закон збережен-

ня механічної енергії. Нульовий рівень відліку потенціальної енергії пов'яжемо з нижнім положенням кулі:

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + mg2l,$$

де l — довжина нитки. Звідси випливає

$$v_1^2 = v_2^2 + 4gl.$$

На мал. 134 зображені сили, що надають кулі доцентрового прискорення при проходженні нижньої A і верхньої B точок траєкторії. Запишемо другий закон Ньютона для цих точок:

$$\text{для точки } A: T - mg = m \frac{v_1^2}{l}, \quad T = m \left(g + \frac{v_1^2}{l} \right);$$

$$\text{для точки } B: mg = m \frac{v_2^2}{l}, \quad v_2^2 = gl.$$

При мінімально можливій швидкості v_2 для проходження кулею верхньої точки доцентрове прискорення кулі надається тільки силою тяжіння. Розв'язуючи записані вище рівняння, отримаємо

$$v_1^2 = 5gl, \quad T = m \left(g + \frac{5gl}{l} \right) = 6mg,$$

що і потрібно було довести.

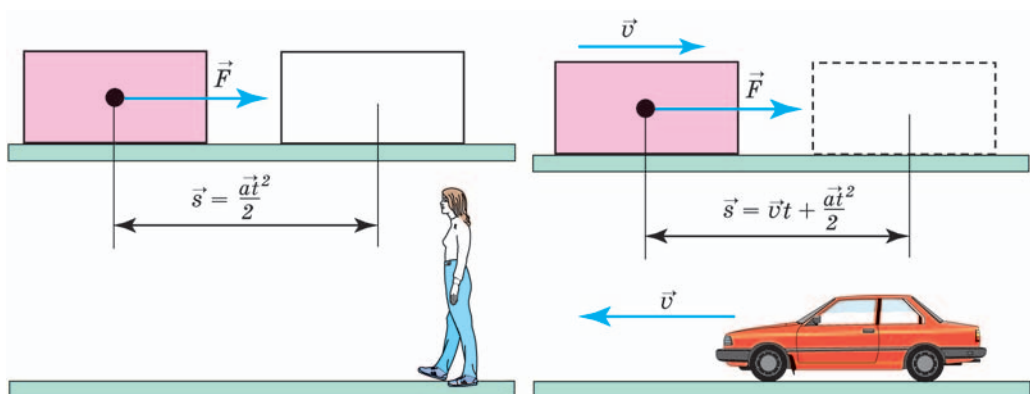
Якщо в одній інерціальній системі відліку механічна енергія замкнутої системи тіл змінюється, наприклад частина її витрачається на нагрівання, то і в будь-яких інших системах, що рухаються відносно першої рівномірно і прямолінійно, відбудеться така сама зміна механічної енергії.

В і д п о в і д ь: Для незамкнутих систем тіл не тільки енергія, а й зміна енергії в різних інерціальних системах відліку різна. Проте рівність між виконаною над системою роботою і зміною кінетичної енергії справджується і в цьому випадку.

2. На нерухоме відносно Землі тіло масою m діє стала сила \vec{F} . Порівняйте зміни кінетичної енергії тіла за час t дії сили в системах відліку, пов'язаних із Землею і з автомобілем, що рухається зі швидкістю \vec{v}_0 у напрямі, протилежному напрямку сили.

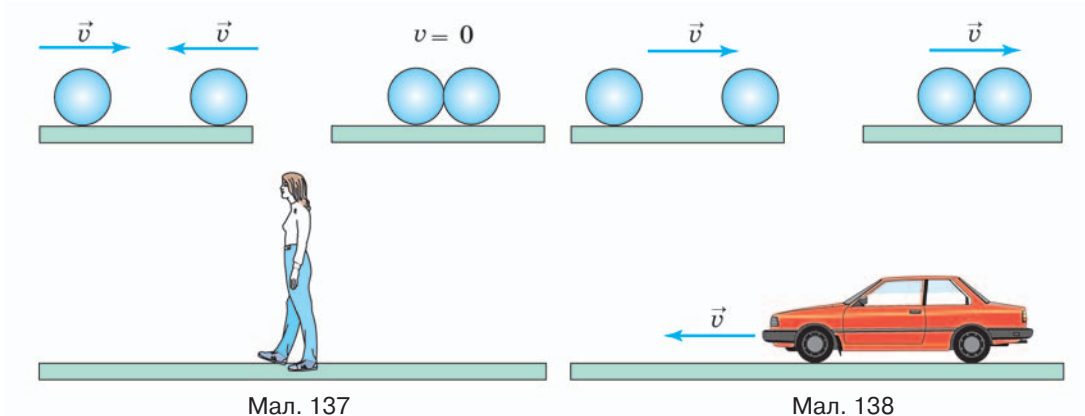
Р о з в' я з а н н я.

Відносно Землі (мал. 135) зміна кінетичної енергії тіла має вигляд



Мал. 135

Мал. 136



Мал. 137

Мал. 138

$$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{m}{2}(at)^2 = \frac{F^2 t^2}{2m};$$

відносно автомобіля, який рухається зі швидкістю \vec{v} у напрямі, протилежному дії сили (мал. 136), зміна кінетичної енергії тіла така:

$$\Delta E'_k = \frac{m}{2}(v_0 + at)^2 - \frac{m}{2}v_0^2 = Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Таким чином, для незамкнених систем тіл навіть зміна механічної енергії в різних інерціальних системах відліку має вигляд $\Delta E_k \neq \Delta E'_k$.

Проте у вказаних системах відліку будуть різними і переміщення за певний час t :

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m}, \quad s' = v_0 t + \frac{at^2}{2} = v_0 t + \frac{Ft^2}{2m}.$$

Отже, і робота сили \vec{F} у цих системах відліку теж буде різною:

$$A = Fs = \frac{F^2 t^2}{2m}, \quad A' = Fs' = Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Порівнюємо зміну кінетичної енергії тіла і виконану в кожній системі відліку роботу.

В і д п о в і д ь: $A = \Delta E_k$, $A' = \Delta E'_k$.

3. У замкнених системах тіл діють внутрішні неконсервативні сили, кінетична енергія системи тіл змінюється, але зміна цієї енергії ΔE_k у різних інерціальних системах відліку однакова. Доведемо це за допомогою прикладу.

Дві кулі однакової маси рухаються назустріч одна одній з однаковими за модулем швидкостями \vec{v} . Порівняйте зміни кінетичної енергії ΔE_k , при непружному зіткненні цих куль у системах відліку, пов'язаних із Землею і з автомобілем, який рухається зі швидкістю, що дорівнює швидкості руху однієї з куль.

Р о з в' я з а н н я.

У системі відліку, пов'язаній з поверхнею Землі (мал. 137), зміна кінетичної енергії куль після непружного удару дорівнює:

$$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - 2 \frac{mu^2}{2}.$$

Швидкість руху куль після удару u визначимо, застосувавши закон збереження імпульсу для проєкцій на напрям руху куль: $mv - mv = 2mu$, звідки $u = 0$ і $\Delta E_k = mv^2$.

У системі відліку, що рухається з такою ж швидкістю v , як одна із куль (мал. 138), зміна кінетичної енергії куль дорівнює:

$$\Delta E'_k = \frac{m(2v)^2}{2} - 2 \frac{mv'^2}{2}.$$

Швидкість руху куль після удару u' визначимо також із закону збереження імпульсу: $m2v = 2mu'$, $u' = v$, звідки випливає:

$$\Delta E'_k = 2mv^2 - mv^2 = mv^2.$$

В і д о в і д ь: зміна кінетичної енергії замкнутої системи тіл у різних інерціальних системах відліку однакова: $\Delta E_k = \Delta E'_k$.

Під час розв'язання задач, в яких розглядається взаємодія тіл з істотно різними масами, зміною енергії тіла більшої маси зазвичай нехтують. І це нехтування часто виявляється цілком коректним у тих системах відліку, в яких «велике тіло» до взаємодії знаходиться у стані спокою. При виборі системи відліку, в якій тіло великої маси до взаємодії мало деяку початкову швидкість, нехтувати зміною кінетичної енергії «великого тіла» вже не можна, навіть якщо воно взаємодіє з тілом, маса якого набагато менша за масу «великого тіла».

Рівень А

225. Визначити роботу, виконану під час рівномірного піднімання вантажу 2 т на висоту 50 см.
226. Вантаж переміщують рівномірно по горизонтальній поверхні, прикладаючи силу 300 Н під кутом 45° до горизонту. Обчисліть роботу, виконану під час переміщення вантажу на відстань 10 м.
227. Кран піднімає вантаж 20 кН. Визначте виконану роботу за перші 5 с, якщо швидкість піднімання 30 м/хв.
228. Яку роботу виконує людина, піднімаючи тіло масою 2 кг на висоту 1 м із прискоренням 3 м/с^2 ?
229. Висота кімнати 3 м, висота стола 0,75 м. На столі стоїть гиря масою 2 кг. Яка потенціальна енергія гирі відносно стола, підлоги, стелі? ($g = 10 \text{ м/с}^2$.)
230. На яку висоту треба підняти вантаж 50 Н, щоб його потенціальна енергія збільшилася на 40 Дж? На скільки треба опустити вантаж униз, щоб його потенціальна енергія зменшилась на 100 Дж?
231. Визначте потенціальну енергію пружини, стиснутої на 30 мм силою 2600 Н.
232. Визначте кінетичну енергію метеорної частинки масою 1 г, якщо вона влітає в атмосферу Землі зі швидкістю 70 км/с.
233. Яку кінетичну енергію має куля масою 20 г, якщо її швидкість руху дорівнює 900 м/с? З якою швидкістю повинен рухатися автомобіль масою 7,2 т, щоб мати таку саму кінетичну енергію?
234. Тіло масою 2 кг вільно падає протягом 6 с. Визначте кінетичну енергію тіла наприкінці падіння.
235. Градина масою 1 г падає з висоти 100 м. Яку кінетичну енергію мала б градина наприкінці падіння, коли б вона падала вільно?

236. Тіло кинули вертикально вгору зі швидкістю 20 м/с. На якій висоті від точки кидання кінетична енергія тіла дорівнюватиме потенціальній?
237. Тіло масою 2 кг падає з висоти 30 м над землею. Обчисліть кінетичну енергію тіла в момент, коли воно перебуває на висоті 10 м над землею.
238. При пробиванні дошки швидкість кулі масою 8 г зменшилась від 600 м/с до 330 м/с. Яка робота виконана з подолання опору дошки?
239. Автомобіль масою 5 т починає гальмувати при швидкості 36 км/год. Яку відстань пройде він від початку гальмування до повної зупинки при дії гальмівної сили 3 кН?

Рівень В

240. З якою швидкістю рухався потяг масою 1500 т, якщо під дією гальмівної сили 150 кН він пройшов із моменту початку гальмування до зупинки шлях 500 м?
241. Яку роботу треба виконати, щоб підняти вантаж 0,3 кН на висоту 10 м із прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$?
242. Навантажена шахтна кліть масою 10 т піднімається з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$. Визначте роботу, що затрачається на піднімання кліті, за перші 10 с руху.
243. Під навантаженням 8 кН стержень подовжився на 0,1 мм. Яка потрібна робота, щоб стержень подовжився на 0,6 мм?
244. У воді з глибини 5 м піднімають до поверхні камінь, об'єм якого становить $0,6 \text{ м}^3$. Густина каменя дорівнює 2500 кг/м^3 . Визначте роботу, затрачену на піднімання каменя.
245. Сплавник пересуває багром пліт, прикладаючи до багра силу 200 Н. Яку роботу виконає сплавник, перемістивши пліт на 10 м, якщо кут між напрямом сили і напрямом переміщення становить 45° ?
246. Чи однакову кінетичну енергію матимуть тіла масами m і $2m$, якщо під час розгону зі стану спокою на них діяти рівними силами протягом того самого часу?
247. Яку швидкість матиме космічна ракета, якщо для досягнення цієї швидкості реактивний двигун виконує $7,2 \cdot 10^7$ Дж роботи на кожен кілограм маси ракети?
248. Куля масою 200 г, рухаючись по горизонтальній поверхні зі швидкістю 5 м/с, вдаряється в нерухому кулю, маса якої 800 г. Удар центральний і непружний. Визначити втрату кінетичної енергії внаслідок удару.
249. Кінець важеля опустили вниз без тертя, діючи із силою 4 Н. На скільки сантиметрів його опустили, якщо потенціальна енергія вантажу, підвішеного до другого кінця, збільшилася на 1,2 Дж?
250. Тіло масою 0,25 кг кинуто вертикально вгору зі швидкістю 4 м/с. Визначте роботу сили тяжіння, зміну потенціальної енергії тіла та зміну кінетичної енергії під час піднімання тіла до максимальної висоти.
251. Камінь вагою 2 Н падає з висоти 5 м і вдавлюється у м'який ґрунт на 5 см. Чому дорівнює середня сила опору ґрунту?

252. Молот вагою 1 кН вільно падає з висоти 80 см на поковку. Обчисліть глибину вм'ятини на поковці, якщо середня сила опору стисковій дорівнює 80 кН.
253. Санки масою 80 кг з'їжджають з гори довжиною 200 м і висотою 20 м, маючи початкову швидкість 6 м/с. Знайдіть швидкість санок у кінці гори, якщо середня сила опору рухові 20 Н.
254. Камінь, пущений по поверхні льоду зі швидкістю 2 м/с, перемістився до повної зупинки на відстань 20,4 м. Визначте коефіцієнт тертя каменя по льоду. Яка кінетична енергія каменя на початку руху, якщо його маса 500 г?
255. Шлях, що його проїхав автомобіль після того, як водій вимкнув двигун, дорівнює 200 м. Визначте роботу сили опору під час гальмування автомобіля, якщо його маса 1,5 т, а коефіцієнт опору 0,02.
256. Санки з хлопчиком загальною масою 60 кг скочуються зі стану спокою з гори висотою 10 м і довжиною 100 м. Яка середня сила опору рухові санок, якщо біля підніжжя гори вони досягли швидкості 10 м/с?

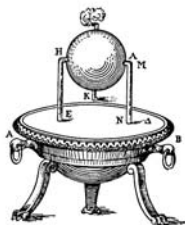


Історична довідка

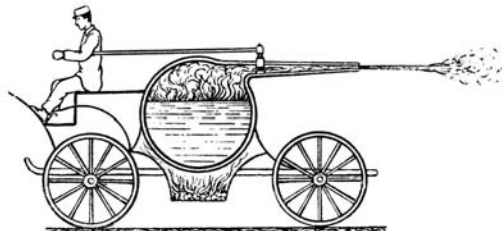
Розвиток вчення про реактивний рух. Ще за 120 р. до н. е. **Герон Олександрійський** сконструював перший (відомий на даний час в історії) реактивний двигун — *еоліпил* (мал. 139). Двигун Герона жерці майстерно використовували для відкривання та закривання дверей храму.

Перші спроби застосування реактивних двигунів для переміщення по землі відносять до XV—XVII ст. Наведемо для прикладу проект реактивного візка І. Ньютона, сконструйований вченим у 1680 р. (мал. 140). У цьому візку центральне місце займає великий паровий котел у вигляді кулі із соплом, повернутим у бік, протилежний руху. Під котлом в особливій жаровні за проектом мали б спалюватися дрова. Реакція струменя пари, що виривалася із сопла, за ідеєю винахідника, мала б надавати візку поступального руху. Водій повинен був тримати в руках кінець досить довгої рукоятки від крана, встановленого на соплі. Відкриваючи менше чи більше кран, водій мав регулювати швидкість руху візка. Однак цей проект реактивного візка, як і багато інших, залишилися лише проектами на папері. Сила реакції, що створювалася потоком пари з котла, була досить малою, щоб штовхати візок.

Уже в XIX ст. деякі вчені робили спроби сконструювати реактивний автомобіль, використовуючи силу реакції пороху. Для цього замість двигуна в задній частині автомобіля встановлювали батарею порохових ракет. Це був ящик із трубками, заку-



Мал. 139



Мал. 140

пореними з одного боку. Водій натиснув кнопку електричного запалу, «постріли» відбувалися один за одним, і автомобіль, отримуючи поштовх за поштовхом, з великою швидкістю рухався вперед. Однак такі автомобілі могли використовуватися лише для встановлення рекордів на короткому прямому відрізку шляху. Їздити на них було неможливо.

Порохові реактивні двигуни знайшли своє застосування в авіації. Під час Другої світової війни їх використовували як засіб для полегшення зльоту навантаженого літака. До літака прикріплювали ракети, які надавали йому поштовх, що, в свою чергу, полегшувало відрив літака від землі.

Реактивний рух був відомий досить давно. Так, найпростіші реактивні снаряди застосовувалися ще у давні часи. Ракети були винайдені китайцями більше ніж дві тисячі років тому. Їх використовували для військових цілей. Використовували ракети для військових цілей і пізніше у різних країнах. Відомий чеський полководець і державний діяч XV ст. Ян Гус наводив панічний страх на своїх ворогів ракетами, які мали вигляд вогняних птахів. Ці жажливі «птахи» хмарами неслися на міста, викликаючи пожежі.

Реактивні снаряди використовувалися при обороні Севастополя, а реактивна артилерія була на озброєнні середньоазійських частин російської армії до 80-х років XIX ст. Російський вчений **К. Константинов** винайшов особливий легкий станок для запуску ракет. Дальність польоту таких реактивних снарядів досягала чотирьох кілометрів. Проте винайдення нарізної зброї загальмувало розвиток реактивної артилерії. Знову ракети з'явилися під час Другої світової війни. Цей новий вид зброї було створено радянськими конструкторами. Знамениті ракетні установки «катюші» наводили жах на німецьких загарбників.

Думку про те, що принцип реактивного руху можна використати для польоту людини, вперше висловив **М. Кібальчич**. Незадовго до страти за революційну діяльність у 1882 р. Кібальчич склав проект літальної машини, яка являла собою велику ракету, що приводилася в рух дією пороху. На той час ще не були відомі інші види пального, які мали запас енергії більший, ніж порох. Принцип дії літальної машини Кібальчича був правильним, але порох як пальне не давав достатню кількість енергії для довготривалого польоту людини.

Більш вигідним у даному випадку виявилось рідке пальне. Рідинні ракети були вперше запропоновані та розроблені знаменитим російським ученим **К. Ціолковським** у 1903 р.

Розробкою наукових основ руху розпочали займатися у кінці XIX ст. два російських учених: професор **І. Мещерський** та вчитель К. Ціолковський. Мещерський встановив основні рівняння руху тіл, маса яких змінюється під час руху. Тоді як Ціолковський зосередив увагу на вивченні ракет. Так, вчений досліджував рух ракети у просторі з відсутнім тягінням та опором. Він запропонував формулу, з якої випливає, що ракета може досягти космічної швидкості, якщо запас пального (його маса) досить великий порівняно з масою корпусу ракети. Спроектований Ціолковським снаряд мав витягнуту обтічну форму. У його головній частині розміщувався екіпаж та прилади керування, а майже увесь інший простір заповнювався палимим — воднем та киснем у рідкому стані. Вони розділялися перегородкою і поступали у камери згоряння, де і відбувалося їх з'єднання. Камера згоряння була з'єднана з соплом. Ціолковський вказував, що дані рідинні ракети придатні для польоту не лише у земній атмосфері, а й у безповітряному просторі.

Незалежно від Ціолковського основні проблеми космонавтики, космічних польотів та конструювання космічних кораблів розробляв український вчений-винахідник, один із конструкторів—піонерів ракетної техніки та теорії космічних польотів **Ю. Кондратюк** (1897—1942). Свої думки він виклав у праці «Тим, хто буде читати, щоб будувати» (1918). Ця праця була пізніше вдосконалена автором і видана під новою назвою «Завоювання міжпланетних просторів» (1929). Кондратюк вводить основне рівняння польоту ракети, розглядає енергетично найекономічніші

траєкторії космічних польотів, викладає теорію багатоступеневих ракет. Вчений запропонував використовувати для ракетного палива деякі метали і неметали та їх водневі сполуки (наприклад, бороводні). У своїй книзі Кондратюк також розглядає проблеми створення проміжних міжпланетних ракетних баз — супутників планет, повернення космічних кораблів на Землю та їх посадку з гальмуванням в атмосфері. Багато ідей, запропонованих Кондратюком, використовуються у космонавтиці, зокрема при створенні космічних систем, при розрахунках траєкторії польотів для посадки на поверхню Місяця. Іменем Кондратюка названо один із кратерів на поверхні Місяця.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. По горизонтальній прямолинійній дорозі рівномірно рухається автомобіль з працюючим двигуном. Чи не протиричить це першому закону Ньютона?
2. Напрямок вектора якої фізичної величини залежить від напрямку рівнодійної сил, прикладених до тіла: швидкості руху тіла, його прискорення чи переміщення?
3. Чим відрізняються одна від одної формули третього закону Ньютона: $F_1 = F_2$, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, $F_1 = -F_2$?
4. Як за результатами вимірювань прискорення вільного падіння можна судити про залягання щільних порід у земних надрах?
5. Як легше запустити штучний супутник Землі: вздовж екватора чи вздовж меридіана?
6. Як можна виміряти жорсткість пружини?
7. Як можна розрахувати вагу тіла, що рухається з прискоренням вертикально вгору?
8. Як напрямлене прискорення, що надається тілу силою тертя ковзання? Силою тертя спокою?
9. Чи можна стверджувати, що імпульс тіла відносний? За яких умов справедливий закон збереження імпульсу?
10. Як здійснюється гальмування космічних кораблів?
11. Що спільного у потенціальних енергій тіла, піднятого над Землею, і пружно деформованого тіла?
12. Чому при дії сили тертя закон збереження механічної енергії порушується?

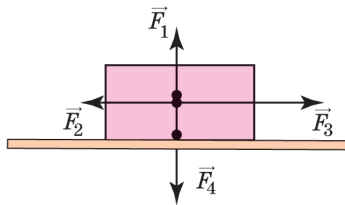
Що я знаю і вмію робити

Я знаю, які є системи відліку

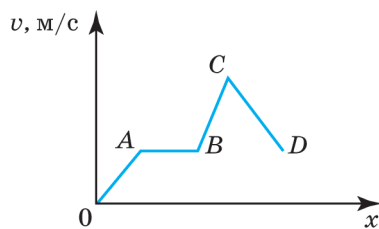
1. Із залізничним складом пов'язана система відліку. В яких випадках вона буде інерціальною: а) поїзд стоїть на станції; б) поїзд відходить від станції; в) поїзд наближається до станції; г) поїзд рухається рівномірно на прямолинійній ділянці залізниці?

Я знаю, що таке маса тіла і вмію її вимірювати

2. Запропонуйте спосіб вимірювання маси тіл, використовуючи їх інертні властивості.



Мал. 141



Мал. 142

Я вмію визначати рівнодійну прикладених до тіла сил

3. Визначте рівнодійну сил, що діють на тіло (мал. 141). Чи буде це тіло рухатися з прискоренням?

Я вмію вимірювати сили

4. До одного кінця динамометра, який може ковзати без тертя по столу, приклали силу 20 Н. Що покаже динамометр?

5. До динамометра приклали дві сили по 20 Н, напрямлені в протилежні боки. Що покаже динамометр?

Я вмію правильно давати визначення фізичних понять

6. Виберіть правильні формулювання: «Явище збереження швидкості руху тіла сталою називають інерцією»; «Явище рівномірного і прямолінійного руху тіла при відсутності дії на нього іншого тіла називають інерцією»; «Явище збереження рівномірного руху тіла при відсутності дії на нього інших тіл називають інерцією».

7. Виберіть правильне твердження: «Переміщення тіла визначається тільки діючою на нього силою»; «Прискорення руху тіла визначається тільки діючою на нього силою і його масою»; «Швидкість руху тіла визначається тільки діючою на нього силою»; «Напрямок руху тіла визначається тільки діючою на нього силою».

8. Чи правильне твердження: «Сила тертя завжди гальмує рух»?

Я вмію аналізувати графіки руху тіла

9. На мал. 142 подано графік швидкості руху потяга. Що можна сказати про співвідношення сили тяги і сили опору руху потяга на різних ділянках?

Я вмію розв'язувати задачі на закони механіки

10. Автомобіль масою 1500 кг починає рухатися горизонтально з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$. Опір його рухові становить 500 Н. Визначте силу тяги, яку розвиває двигун.

11. Людина масою 50 кг, яка стоїть на ковзанах, відштовхує від себе кулю масою 2 кг силою 20 Н. Яке прискорення отримують при цьому людина і куля?

12. У скільки разів сила притягання супутника більша на поверхні Землі, ніж на висоті трьох земних радіусів над поверхнею?

13. Два однакових тіла масою по 2 кг кожне з'єднані пружиною, жорсткість якої 230 Н/м. На скільки розтягнеться пружина, якщо за одне тіло тягнути всю систему вертикально вгору силою 4,6 Н? Масою пружини знехтувати.

14. Візок масою 1 кг рухається зі швидкістю 8 м/с назустріч візку масою 2 кг, який рухається зі швидкістю 3,5 м/с. Після зіткнення візки з'єднуються і продовжують рух як одне ціле. Яка швидкість їх руху?

15. М'яч масою 0,5 кг вільно падає з висоти 7 м. Визначте його кінетичну енергію на висоті 5 м.

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант 1

1. Автомобіль рухається рівномірно і прямолінійно зі швидкістю \vec{v} (мал. 143). Який напрям має рівнодійна всіх сил, прикладених до автомобіля?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. $\vec{F} = 0$.

2. На мал. 144, а зображені напрямки швидкості \vec{v} і прискорення \vec{a} м'яча. Який з наведених на малюнку 144, б напрямків має рівнодійна всіх сил, прикладених до м'яча?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

3. Як буде рухатися тіло масою 2 кг під дією сили 4 Н?

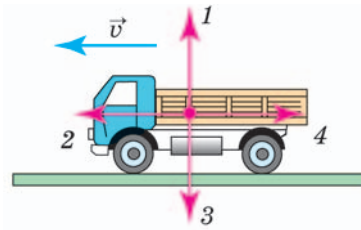
А. Рівномірно, зі швидкістю 2 м/с.

Б. Рівноприскорено, з прискоренням 2 м/с².

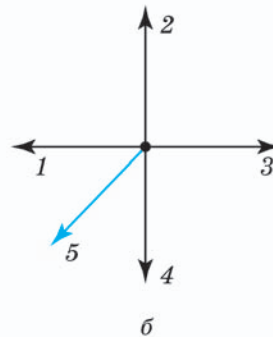
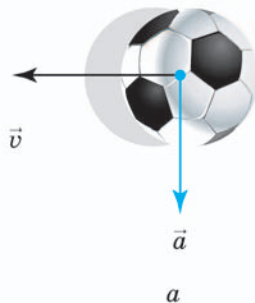
В. Рівноприскорено, з прискоренням 0,5 м/с².

Г. Рівномірно, зі швидкістю 0,5 м/с.

Д. Рівноприскорено, з прискоренням 8 м/с².



Мал. 143



Мал. 144

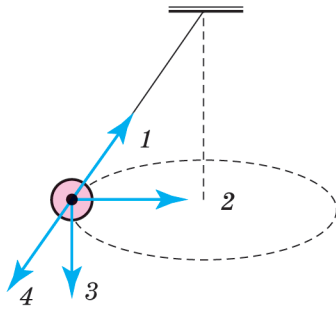
4. Дві сили $F_1 = 3$ Н і $F_2 = 4$ Н прикладені до однієї точки тіла. Кут між напрямками сил дорівнює 90° . Чому дорівнює модуль рівнодійної цих сил?

А. 7 Н. Б. 1 Н. В. 5 Н. Г. $\sqrt{7}$ Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

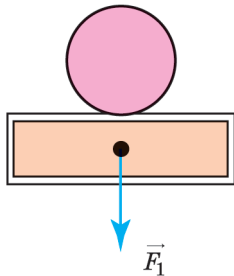
5. Куля, підвішена на нитці, рухається рівномірно по колу в горизонтальній площині (мал. 145). Який напрям має рівнодійна всіх прикладених до тіла сил?

А. $\vec{F} = 0$. Б. 1. В. 2. Г. 3. Д. 4.

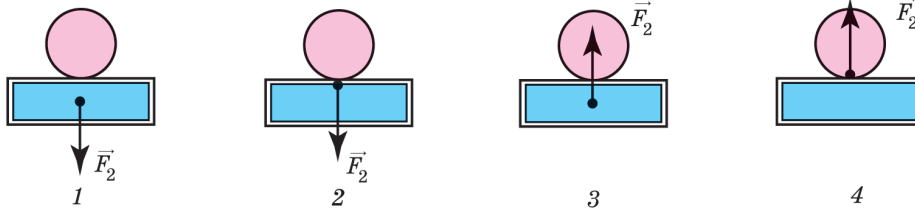
6. На мал. 146 показані напрям і точка прикладання сили \vec{F}_1 , яка діє під час удару м'яча. На якому з малюнків (мал. 147 (1—4)) правильно пока-



Мал. 145



Мал. 146

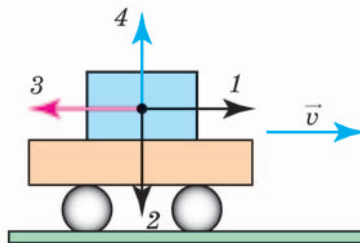


Мал. 147

10. Брусок лежить нерухомо на горизонтальній платформі, яка рухається рівномірно і прямолінійно зі швидкістю \vec{v} (мал. 148). Який напрям має сила тертя $F_{\text{тер}}$, що діє на брусок?

А. $F_{\text{тер}} = 0$. Б. 1. В. 2. Г. 3. Д. 4.

11. Як зміниться сила тертя ковзання під час руху бруска по горизонтальній поверхні, якщо при незмінному значенні сили нормального тиску площу стичних поверхонь збільшити в 2 рази?



Мал. 148

зані напрям і точка прикладання сили \vec{F}_2 , яка виникає під час взаємодії м'яча і підставки?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед малюнків 1—4 немає правильного.

7. Поблизу поверхні Землі (тобто на відстані R від її центра) на тіло діє сила всесвітнього тяжіння 36 Н. Чому дорівнює сила тяжіння, яка діє на це тіло на відстані $2R$ від центра Землі?

А. 18 Н. Б. 12 Н. В. 4 Н. Г. 9 Н. Д. 36 Н.

8. Сила гравітаційної взаємодії між двома кулями масами $m_1 = m_2 = 1$ кг на відстані R дорівнює F . Чому дорівнює сила гравітаційної взаємодії між кулями масами 2 кг і 1 кг на такій же відстані R одна від одної?

А. F . Б. $3F$. В. $2F$. Г. $4F$. Д. $9F$.

9. Під дією сили 2 Н пружина видовжилася на 4 см. Чому дорівнює жорсткість пружини?

А. 2 Н/м. Б. 0,5 Н/м. В. 0,02 Н/м. Г. 50 Н/м. Д. 0,08 Н/м.

А. Не зміниться.

Б. Збільшиться в 2 рази.

В. Зменшиться в 2 рази.

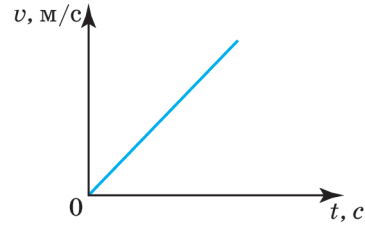
Г. Збільшиться в 4 рази.

Д. Зменшиться в 4 рази.

12. Одну цеглину поклали на іншу і підкинули вертикально вгору. Коли сила тиску ве-

рхньої цеглини на нижню буде дорівнювати нулю? Опором повітря знехтувати.

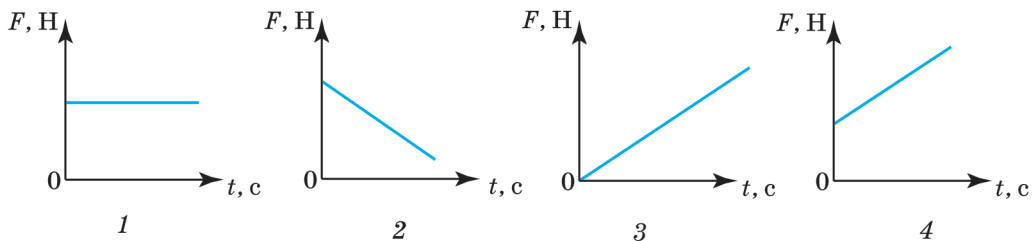
- А. Тільки під час руху вгору.
 Б. Тільки під час руху вниз.
 В. Тільки під час досягнення верхньої точки.
 Г. Під час всього польоту не дорівнює нулю.
 Д. Під час всього польоту після кидка дорівнює нулю.



Мал. 149

13. Модуль швидкості руху тіла, що рухається прямолінійно, змінювався з часом за законом, зображеним графічно на мал. 149. Який з графіків, наведених на мал. 150 (1—4), виражає залежність від часу модуля рівнодійної F всіх сил, що діють на тіло?

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. $F = 0$.



Мал. 150

14. Якою повинна бути початкова швидкість v_0 руху тіла, напрямлена паралельно поверхні Землі в точці, що знаходиться за межами атмосфери, щоб воно рухалося навколо Землі по параболі?

- А. $v_0 < 7,9$ км/с. Б. $v_0 \approx 7,9$ км/с. В. $7,9$ км/с $< v_0 < 11,2$ км/с.
 Г. $v_0 \approx 11,2$ км/с. Д. $v_0 > 11,2$ км/с.

15. Ліфт піднімається з прискоренням 1 м/с², його прискорення напрямлене вертикально вгору. У ліфті знаходиться тіло, маса якого 1 кг. Яка вага тіла?

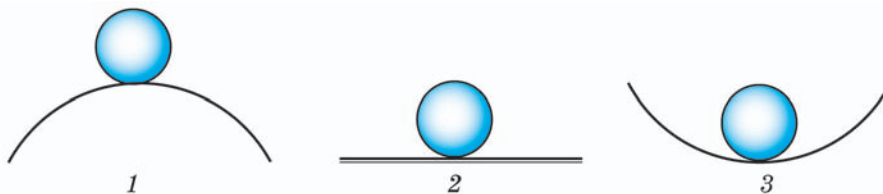
- А. 10 Н. Б. 1 Н. В. 11 Н. Г. 9 Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

16. На якій поверхні нерухомий м'яч буде знаходитися у стані нестійкої рівноваги (мал. 151)?

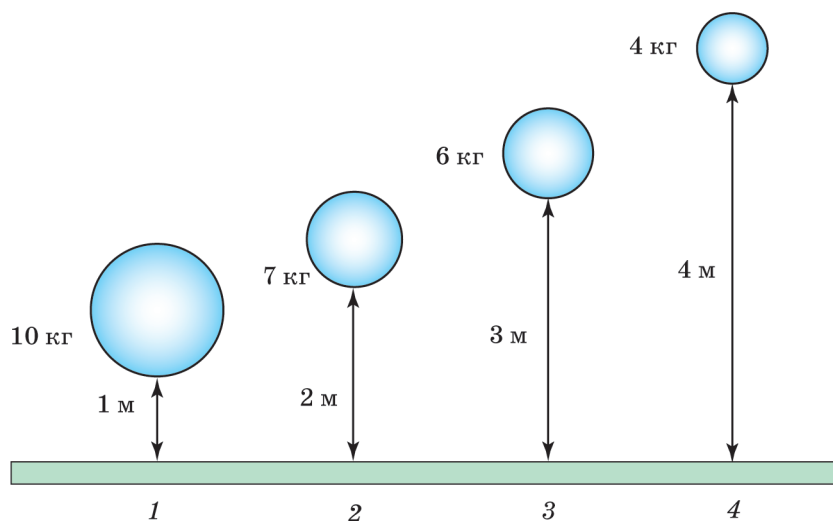
- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. В усіх трьох точках. Д. Ні в одній із трьох точок.

17. Два автомобілі однакової маси m рухаються зі швидкостями v і $2v$ відносно Землі в одному напрямі. Чому дорівнює імпульс другого автомобіля в системі відліку, пов'язаній з першим автомобілем?

- А. mv . Б. $2mv$. В. $3mv$. Г. 0 . Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.



Мал. 151



Мал. 152

18. Швидкість легкового автомобіля в 2 рази більша за швидкість вантажного, а маса вантажного автомобіля в 2 рази більша за масу легкового. Порівняйте значення кінетичної енергії легкового $E_{\text{к.легк}}$ і вантажного $E_{\text{к.вант}}$ автомобілів.

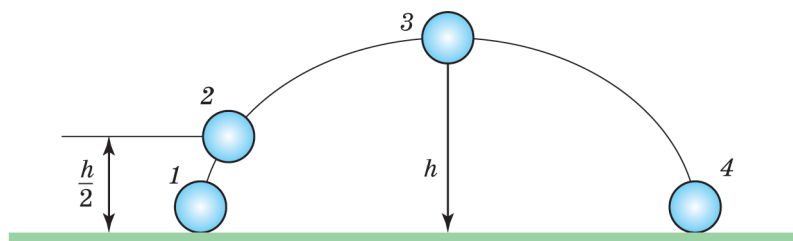
- А. $E_{\text{к.легк}} = E_{\text{к.вант}}$.
- Б. $E_{\text{к.легк}} = 2E_{\text{к.вант}}$.
- В. $E_{\text{к.вант}} = 2E_{\text{к.легк}}$.
- Г. $E_{\text{к.легк}} = 4E_{\text{к.вант}}$.
- Д. $E_{\text{к.вант}} = 4E_{\text{к.легк}}$.

19. На мал. 152 зображені положення 4 тіл (1—4) різної маси на різних відстанях від поверхні Землі. Яке з цих тіл має найбільший запас потенціальної енергії?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Потенціальна енергія всіх тіл однакова.

20. Як зміниться запас потенціальної енергії пружно деформованого тіла при збільшенні його деформації в 2 рази?

- А. Зменшиться в 2 рази.
- Б. Збільшиться в 2 рази.
- В. Збільшиться в 4 рази.
- Г. Не зміниться.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.



Мал. 153

21. На мал. 153 зображена траєкторія руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. В якій точці траєкторії кінетична енергія тіла мала максимальне значення? Опором повітря знехтувати.

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. В усіх точках однакова.

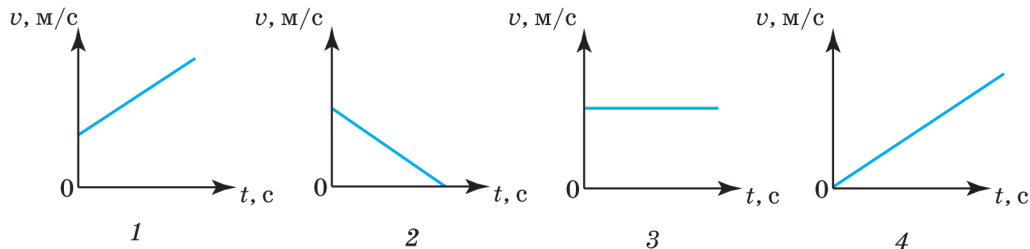
22. Два автомобілі однакової маси m рухаються зі швидкостями v і $2v$ відносно Землі в протилежних напрямках. Чому дорівнює кінетична енергія другого автомобіля в системі відліку, пов'язаної з першим автомобілем?

А. $0,5 mv^2$. Б. mv^2 . В. $2 mv^2$. Г. $4,5 mv^2$. Д. $1,5 mv^2$.

В а р і а н т І І

1. Під час руху парашутиста рівнодійна всіх сил, що діють на нього, дорівнює нулю. Який із графіків залежності модуля швидкості руху парашутиста від часу (мал. 154) відповідає цьому руху?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед графіків 1—4 немає правильного.



Мал. 154

2. На мал. 155, а зображені напрямки швидкості \vec{v} і прискорення \vec{a} м'яча. Який з наведених на мал. 155, б напрямків має рівнодійна всіх сил, прикладених до м'яча?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

3. Як буде рухатися тіло масою 8 кг під дією сили 4 Н?

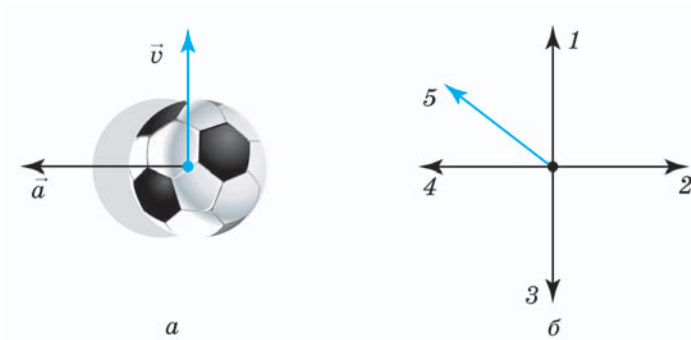
А. Рівномірно, зі швидкістю 2 м/с.

Б. Рівноприскорено, з прискоренням 2 м/с².

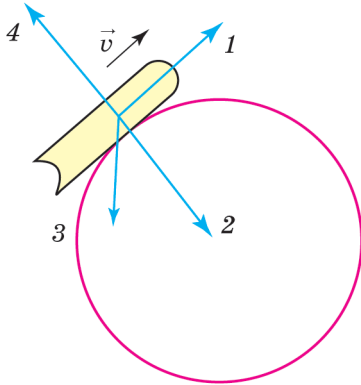
В. Рівноприскорено, з прискоренням 0,5 м/с².

Г. Рівномірно, зі швидкістю 0,5 м/с.

Д. Рівноприскорено, з прискоренням 32 м/с².



Мал. 155



Мал. 156

4. Дві сили $F_1 = 2 \text{ Н}$ і $F_2 = 4 \text{ Н}$ прикладені до однієї точки тіла. Кут між напрямками сил дорівнює 0° . Чому дорівнює модуль рівнодійної цих сил?

А. 6 Н. Б. 2 Н. В. $\sqrt{20}$ Н. Г. 20 Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

5. Літак під час виконання «мертвої петлі» рухається рівномірно по колу (мал. 156). Який напрям має рівнодійна всіх прикладених до нього сил?

А. $\vec{F} = 0$. Б. 1. В. 2. Г. 3. Д. 4.

6. На мал. 157 зображені напрям і точка прикладання сили \vec{F}_1 , з якою Земля діє на Місяць за законом всесвітнього тяжіння. На якому з малюнків (мал. 158 (1—4)) правиль-

но показані напрям і точка прикладання сили \vec{F}_2 , яка виникає під час взаємодії Землі і Місяця?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед малюнків 1—4 немає правильного.

7. Поблизу поверхні Землі (тобто на відстані R від її центра) на тіло діє сила всесвітнього тяжіння 36 Н . Чому дорівнює сила тяжіння, яка діє на це тіло на відстані $2R$ від поверхні Землі?

А. 9 Н. Б. 12 Н. В. 18 Н. Г. 36 Н. Д. 4 Н.

8. Сила гравітаційної взаємодії між двома кулями масами $m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}$ на відстані R дорівнює F . Чому дорівнює сила гравітаційної взаємодії між кулями масами 3 кг і 4 кг на такій же відстані R одна від одної?

А. $7F$. Б. $49F$. В. $144F$. Г. F . Д. $12F$.

9. Пружина жорсткістю 100 Н/м розтягується силою 20 Н . Чому дорівнює видовження пружини?

А. 5 см. Б. 20 см. В. 5 м. Г. 0,2 см. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

10. Брусок рухається рівномірно вгору по похилій площині (мал. 159). Який напрям має сила тертя?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. $F_{\text{тер}} = 0$.

11. Як зміниться сила тертя ковзання під час руху бруска по горизонтальній поверхні, якщо силу нормального тиску збільшити в 3 рази?

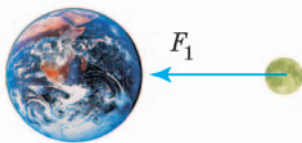
А. Збільшиться в 3 рази.

Б. Зменшиться в 3 рази.

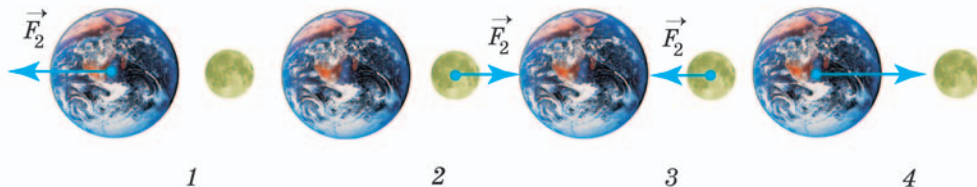
В. Збільшиться в 9 разів.

Г. Зменшиться в 9 разів.

Д. Не зміниться.



Мал. 157



Мал. 158

12. Космічний корабель після вимкнення ракетних двигунів рухається вертикально вгору, досягає верхньої точки траєкторії і потім рухається вниз. На якій ділянці цієї траєкторії сила тиску космонавта на крісло має максимальне значення?

- А. Під час руху вгору.
 Б. У верхній точці траєкторії.
 В. Під час руху вниз.

Г. Під час всього польоту сила тиску однакова і не дорівнює нулю.

Д. Під час всього польоту сила тиску дорівнює нулю.

13. Модуль швидкості руху тіла, що рухається прямолінійно, змінювався з часом за законом, зображеним графічно на мал. 160. Який з графіків, наведених на мал. 161 (1—4), виражає залежність від часу модуля рівнодійної F всіх сил, що діють на тіло?

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. $F = 0$.

14. Якою повинна бути початкова швидкість v_0 руху тіла, яка напрямлена паралельно поверхні Землі в точці, що знаходиться за межами атмосфери, щоб воно рухалося навколо Землі по еліпсу?

- А. $v_0 < 7,9$ км/с.
 Б. $v_0 \approx 7,9$ км/с.
 В. $7,9$ км/с $< v_0 < 11,2$ км/с.
 Г. $v_0 \approx 11,2$ км/с.
 Д. $v_0 > 11,2$ км/с.

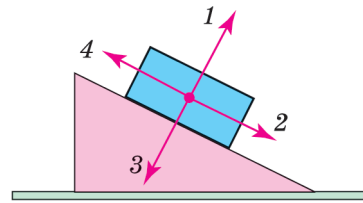
15. Ліфт опускається з прискоренням 10 м/с² вертикально вниз. У ліфті знаходиться тіло, маса якого 1 кг. Яка вага тіла? Прискорення вільного падіння прийняти за 10 м/с².

А. 0 Н. Б. 10 Н. В. 20 Н. Г. 1 Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

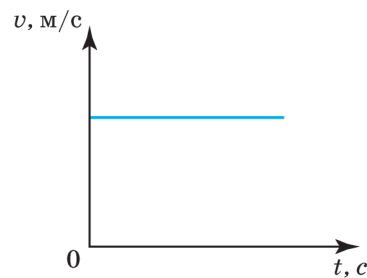
16. На якій поверхні нерухомий м'яч буде знаходитися в стані стійкої рівноваги (мал. 162)?

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. На усіх трьох. Д. Ні на одній із трьох.

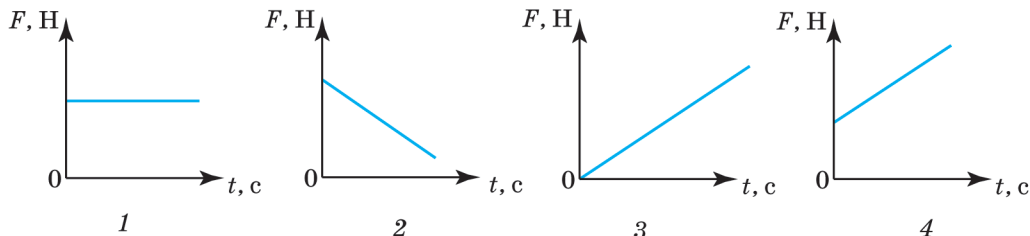
17. Під час пострілу з автомата куля масою m вилітає зі швидкістю v . Якого імпульсу набуває внаслідок пострілу автомат, якщо його маса в 500 разів більша за масу кулі?



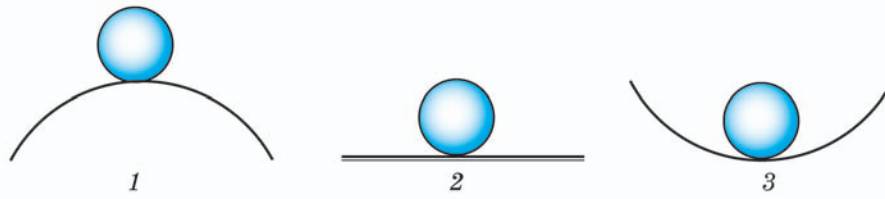
Мал. 159



Мал. 160



Мал. 161



Мал. 162

А. mv . Б. $500 mv$. В. $1/500 mv$. Г. 0. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

18. Швидкість легкового автомобіля в 4 рази більша за швидкість вантажного, а маса вантажного автомобіля в 2 рази більша за масу легкового. Порівняйте значення кінетичної енергії легкового $E_{\text{к.легк}}$ і вантажного $E_{\text{к.вант}}$ автомобілів.

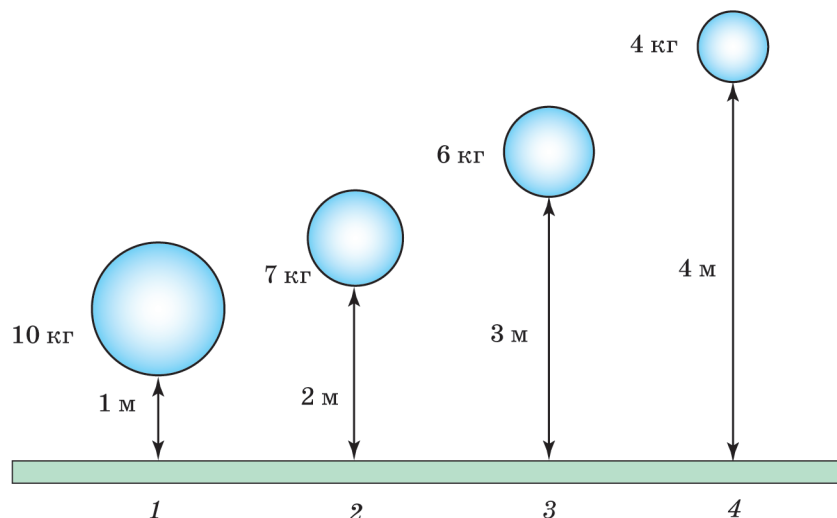
- А. $E_{\text{к.легк}} = E_{\text{к.вант}}$.
 Б. $E_{\text{к.легк}} = 2E_{\text{к.вант}}$.
 В. $E_{\text{к.легк}} = 4E_{\text{к.вант}}$.
 Г. $E_{\text{к.легк}} = 8E_{\text{к.вант}}$.
 Д. $E_{\text{к.легк}} = 16E_{\text{к.вант}}$.

19. На мал. 163 зображені положення 4 тіл (1—4) різної маси на різних відстанях від поверхні Землі. Яке з цих тіл має найменший запас потенціальної енергії?

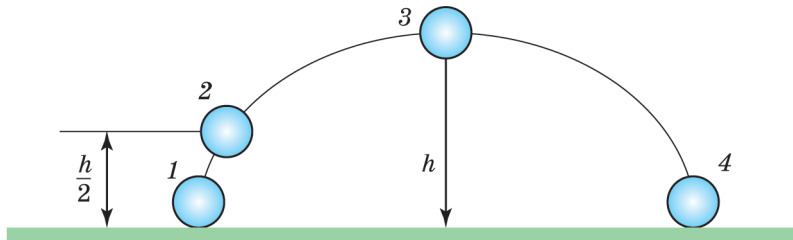
- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Потенціальна енергія всіх тіл однакова.

20. Як зміниться запас потенціальної енергії пружно деформованого тіла при збільшенні його деформації в 3 рази?

- А. Не зміниться.
 Б. Збільшиться в $\sqrt{3}$ разів.
 В. Збільшиться в 3 рази.
 Г. Збільшиться в 9 разів.
 Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.



Мал. 163



Мал. 164

21. На мал. 164 зображена траєкторія руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. В якій точці траєкторії сума кінетичної і потенціальної енергії тіла мала максимальне значення? Опором повітря знехтувати.

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. В усіх точках однакова.

22. Два автомобілі однакової маси m рухаються зі швидкостями v і $2v$ відносно Землі в одному напрямі. Чому дорівнює кінетична енергія другого автомобіля в системі відліку, пов'язаній з першим автомобілем?

А. $0,5 mv^2$. Б. mv^2 . В. $2 mv^2$. Г. $4,5 mv^2$. Д. $1,5 mv^2$.