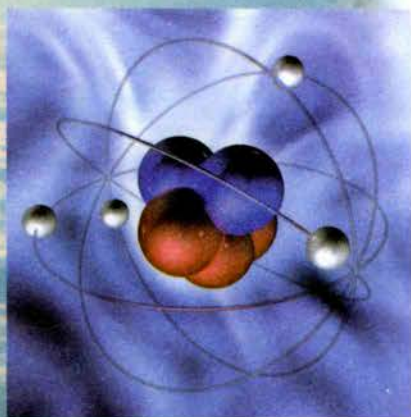


ІЗИКА

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

10



ББК 22.3я721
С 40

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

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 стандарту)/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 вмію 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
Контрольні запитання	163
Що я знаю і вмю робити	163
Тестові завдання	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
Контрольні запитання	184
Що я знаю і вмю робити	184
Тестові завдання	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 вмю 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 вмю 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 вмю 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».

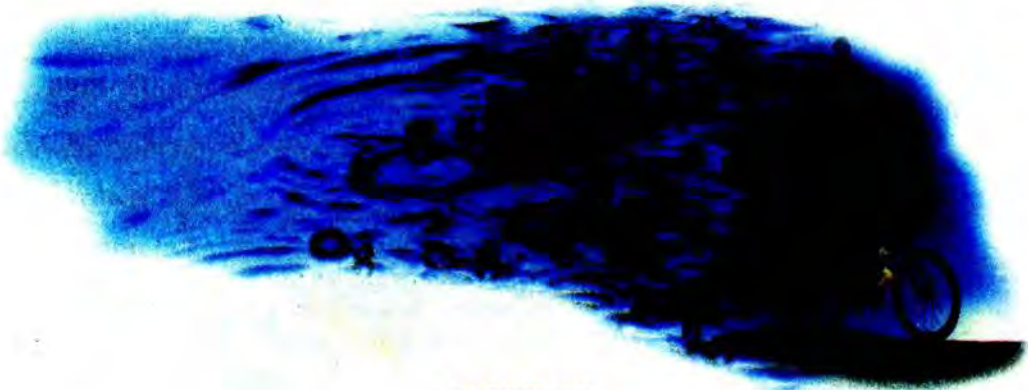
Якщо вам знадобиться дізнатися про якийсь фізичний термін або правило, то скористайтеся «Словником фізичних термінів» і предметно-іменним покажчиком, що містяться наприкінці підручника.

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!



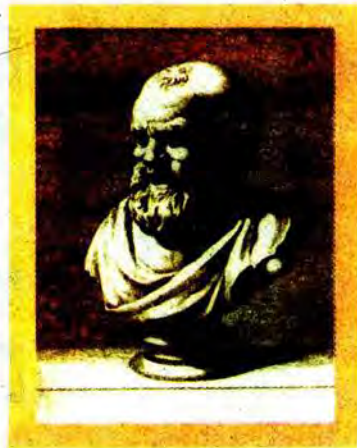
ВСТУП

- 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.

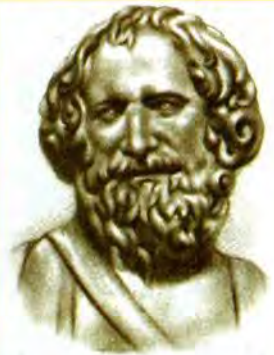
Новий етап у розвитку науки починається з середини I тисячоліття до нашої ери, коли на історичну арену виходить Стародавня Греція. Родоначальником першої грецької філософської школи був Фалес із Мілета (бл. 625—547 до н.е.), якого називали одним із семи мудреців стародавніх часів. Від нього беруть початок 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.

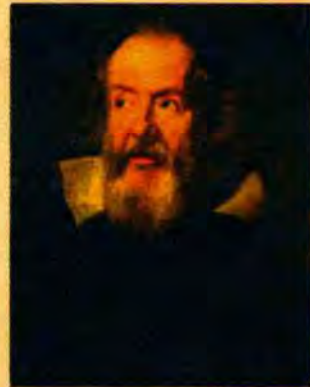
У XIII ст. з'явився провісник нової експериментальної науки **Р. Бекон** (1214—1294), який стверджував, що істинне знання здобувається дослідно; сам багато експериментував, зокрема дізнався про склад пороху, досліджував властивості пари, винайшов способи одержання у чистому виді фосфору, магнію, вісмуту 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 десь-так 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-**



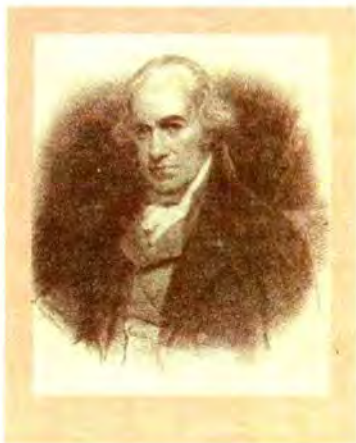
Данііл Бернуллі



Михайло Васильович Ломоносов



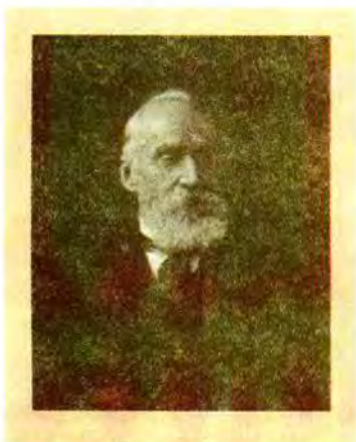
Рене Декарт



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 (взятої 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-



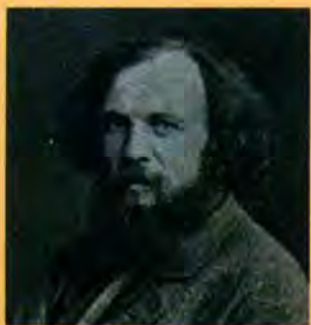
Рудольф Клаузіус



Поль Клапейрон



Амадео Авогадро



Дмитро Іванович
Менделєєв



Джеймс Джоуль



Герман Гельмгольц

цузкий 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 пороку 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 розрахував 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 цілості, 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 розрахувати 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**.

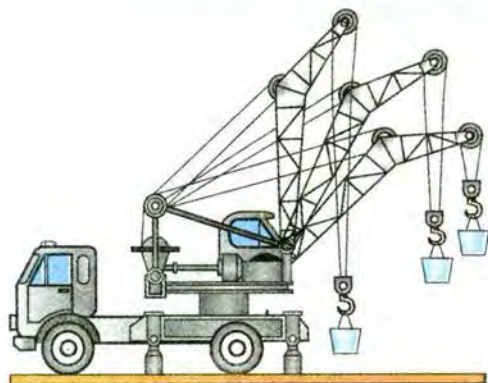
Отже, щоб розв'язати основну задачу механіки, насамперед треба з'ясувати, які існують різновиди руху та їх характеристики.

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 визначати 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

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

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

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.

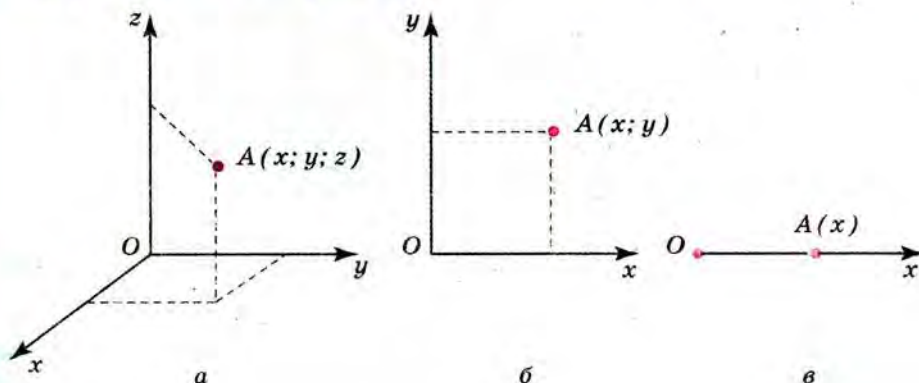
Місцезнаходження досліджуваного тіла під час руху можна визначити, вказавши його розташування відносно іншого тіла.

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 напрямку 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: $\Delta x = x - x_0, \Delta y = y - y_0, \Delta z = z - z_0, \Delta t = t - t_0$.

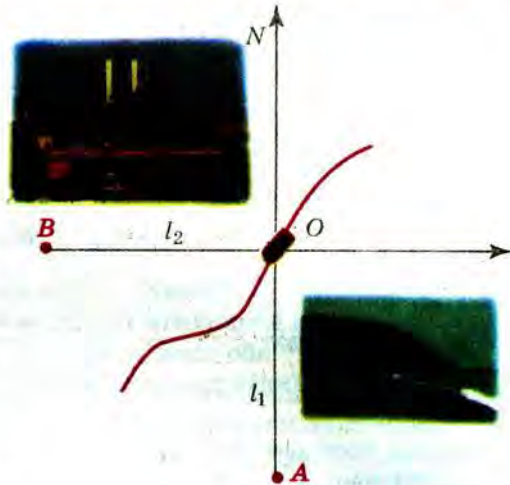
2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

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 А (мал. 4). Водночас можна сказати, що автомобіль знаходиться на відстані l_2 на схід від пункту В. 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 впливає 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.

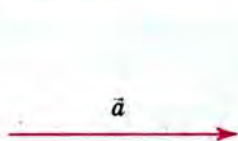
Відповідаючи на запитання, рухається тіло чи знаходиться в стані спокою, необхідно вказати, відносно яких тіл розглядається рух цього тіла. Безглуздо і неможливо розглядати якийсь «абсолютний рух» тіла або «рух взагалі», безвідносно до певного тіла відліку.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

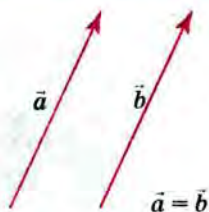
1. У чому полягає відносність механічного руху?
2. Як визначити, рухається тіло чи перебуває у стані спокою?
3. Поясніть, хто перебуває в русі: пасажир, який їде в автобусі, чи людина, яка стоїть на автобусній зупинці?
4. Що насправді рухається: Земля навколо Сонця чи Сонце навколо Землі?

§ 4 ВЕКТОРНІ І СКАЛЯРНІ ВЕЛИЧИНИ. ДІЇ НАД ВЕКТОРАМИ

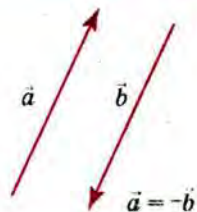
Фізичні величини, що характеризують фізичну систему і її стани (наприклад, взаємодію і механічний рух тіл) відображаються відповідними



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.

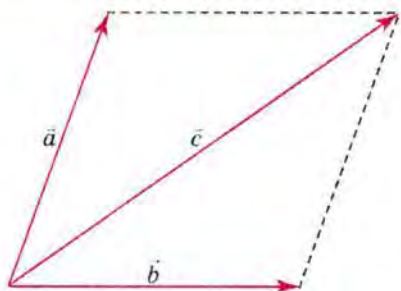
Позначають вектори напівжирними літерами, наприклад, \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , або світлими літерами зі стрілками над ними: \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} .

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.

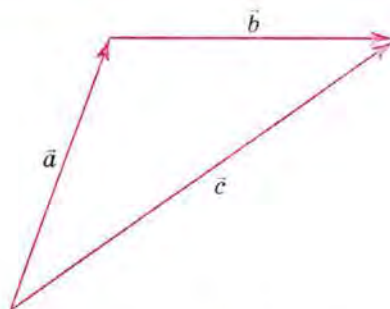
Вектори \vec{a} і \vec{b} є рівними, якщо вони мають однакові модулі і напрями (мал. 6). Вектори можна множити на скаляр. Якщо помножити вектор \vec{a} на скаляр k , то отримаємо вектор \vec{p} такого самого напрямку, як у вектора \vec{a} , з модулем, що дорівнюватиме добутку модуля вектора \vec{a} на 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).

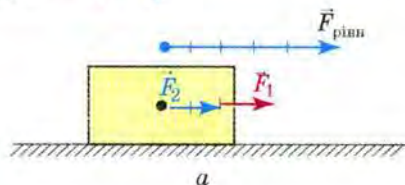
Якщо вектори \vec{a} і \vec{b} не мають спільного початку, то їх можна за допомогою паралельного перенесення привести до спільного початку.

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).

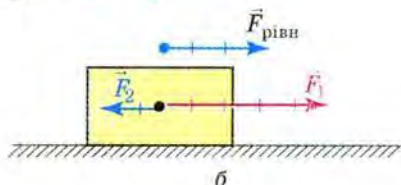
Колінеарні вектори додаються так само, як і **неколінеарні**, які ми розглядали вище. Задача у цьому разі значно спрощується, результат вам добре відомий: за модулем результуючий вектор дорівнює або арифметичній сумі (коли вектори напрямлені в один бік), або арифметичній різниці

$$F_{\text{рівн}} = F_1 + F_2$$



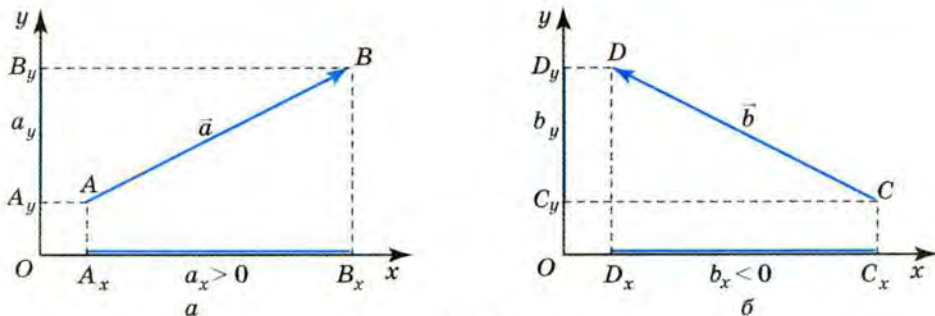
а

$$F_{\text{рівн}} = F_1 - F_2$$



б

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 ознайомимося 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 проєкцій усіх його точок на цю вісь; це буде **відрізок на осі, обмежений проєкціями початку і кінця даного відрізка.**

На мал. 11, *a*, *b* 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, *b*, C_x , D_x — проекції початку і кінця вектора \vec{b} на вісь Oy . Визначаючи проекції 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.

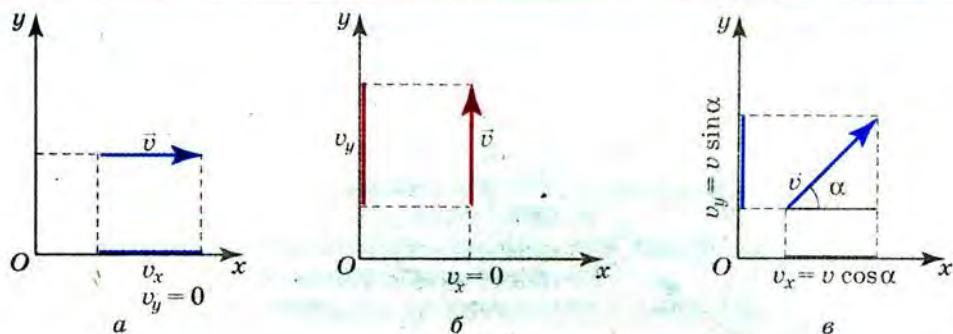
Проекцію вектора на обрану вісь вважають від'ємною, якщо від проекції початку вектора до проекції його кінця треба рухатися у напрямі, протилежному напрямку цієї вісі.

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 проєкцій 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 для вправи

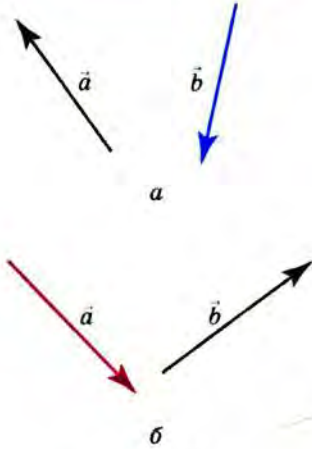
Розв'язуємо разом

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.



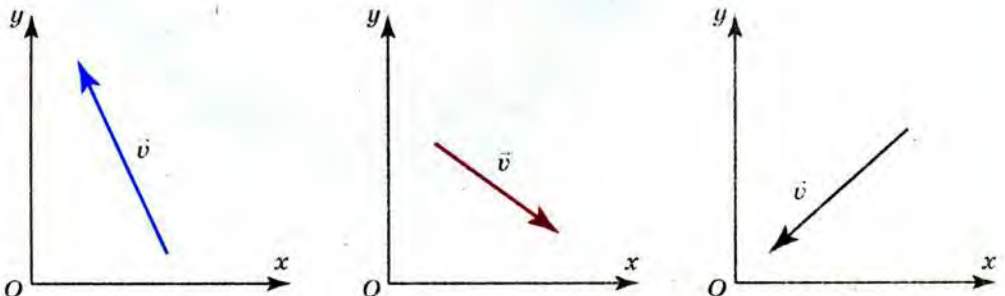
Мал. 13

Рівень А

1. Які рухи є рівномірними, а які — нерівномірними: а) рух літака на зльоті; б) спускання на ескалаторі метрополітену; в) рух поїзда при наближенні до станції?
2. Яким буде рух колеса автомобіля, коли за ним спостерігатиме людина, що сидить у цьому автомобілі біля вікна?
3. Наведіть приклади задач, в яких Місяць: а) можна вважати матеріальною точкою; б) не можна вважати матеріальною точкою.
4. 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?
5. Чи може людина, яка знаходиться на рухомому ескалаторі, бути у стані спокою в системі відліку, пов'язаній із Землею?
6. Додайте вектори за правилами трикутника і паралелограма (мал. 13, а, б).

Рівень В

7. Велосипедист, що рухається по дорозі, крутить педалі. Який при цьому рух педалей — поступальний чи обертальний?
8. Чи можна вважати матеріальною точкою снаряд під час розрахунку: а) дальності польоту снаряда; б) форми снаряда, яка забезпечує зменшення опору повітря?
9. Чи можна вважати матеріальною точкою залізничний состав довжиною приблизно 1 км під час розрахунку шляху, пройденого за кілька секунд?
10. 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).

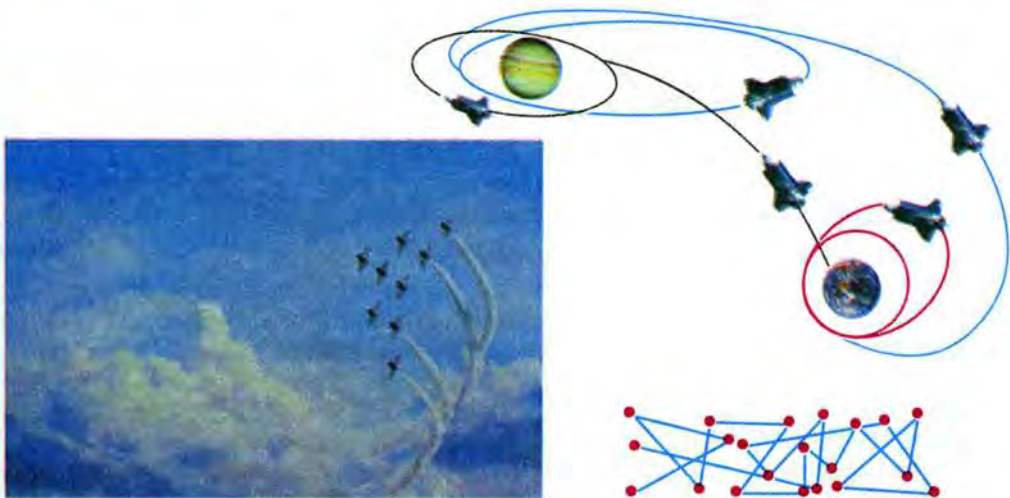
§ 5 ТРАЕКТОРІЯ РУХУ. ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ

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.

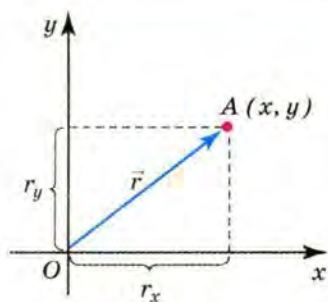
Траєкторією руху точки називається уявна лінія, яку описує тіло під час руху.

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} , 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 зміним 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.

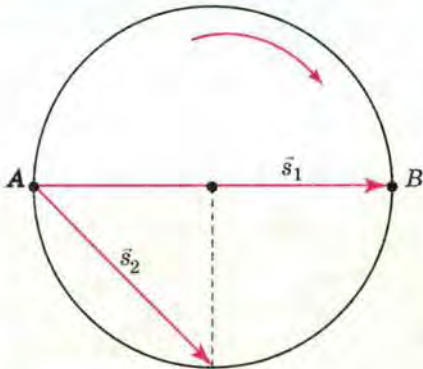
В процесі руху шлях, пройдений тілом, із часом може тільки зростати, а переміщення, залежно від виду руху, з часом може зростати, зменшуватися



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:

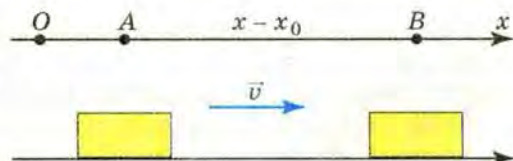
$$v_x = \frac{s_x}{t}, \quad (1.7)$$

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.



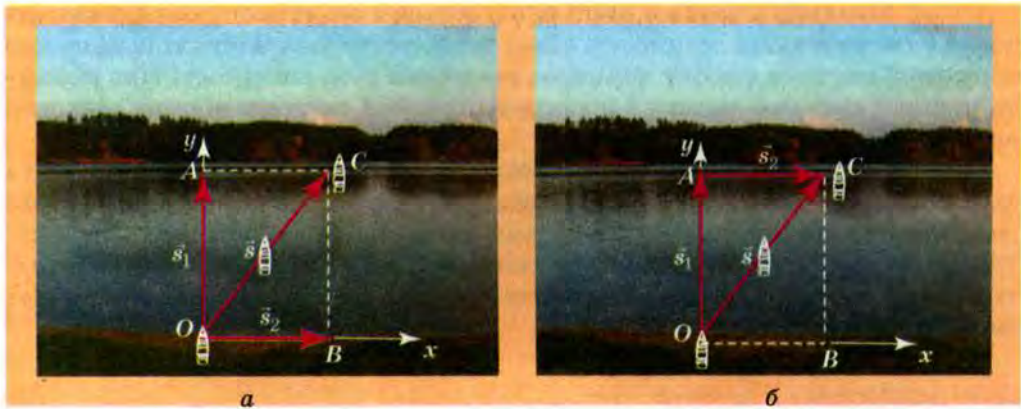
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

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

Ох 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 В.

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, а) 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 С.

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»?

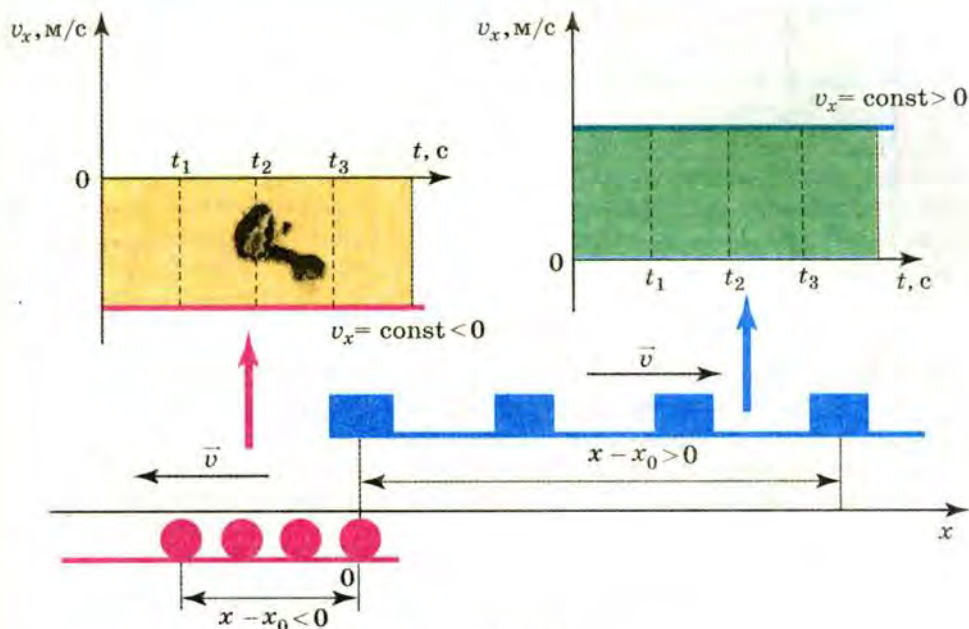
§ 8 ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РІВНОМІРНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

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

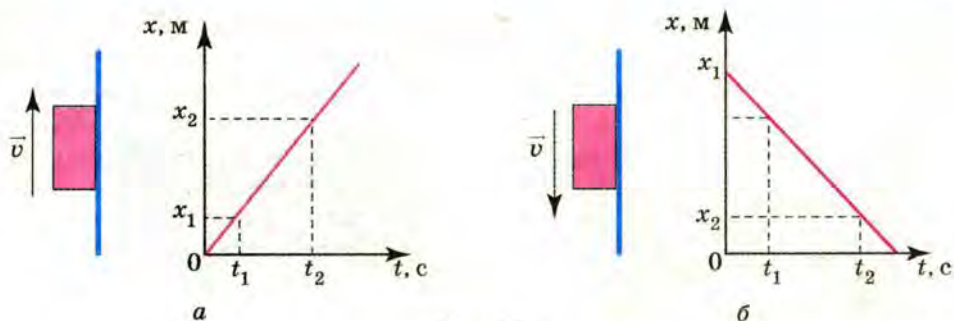
чення проекції швидкості одне й те саме, то графік складатиметься з точок, рівновіддалених від осі часу, тобто матиме вигляд прямої, яка паралельна осі часу.

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

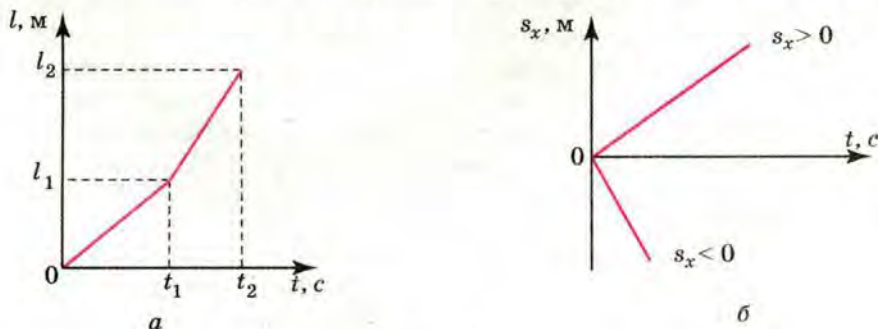
Відповідно до залежності $x = x_0 + v_x t$ графік рівномірного прямолінійного руху тіла зображатиметься прямою лінією, яка проходить через точку x_0 на осі ординат під певним кутом нахилу до осі часу.

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 визначити 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.

$$v_{\text{сер}} = \frac{l}{t},$$

де $v_{\text{сер}}$ — 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 пригадаєте 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** $\vec{v}_{\text{сер}}$. 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.

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

де $\vec{v}_{\text{сер}}$ — 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:

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

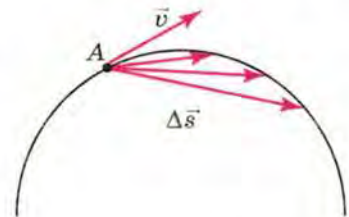
де $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_n$ — переміщення тіла за відповідні інтервали часу t_1, t_2, \dots, t_n .

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 даний точці траєкторії.

Для визначення миттєвої швидкості у точках довільної траєкторії скористаємося введеним вище поняттям середньої швидкості переміщення $\vec{v}_{\text{сер}}$. 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 $\vec{v}_{\text{сер}} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$, 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 напрямком 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 напрямком 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.

2 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 їде 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; р) $v = 6$, 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. Відносне 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

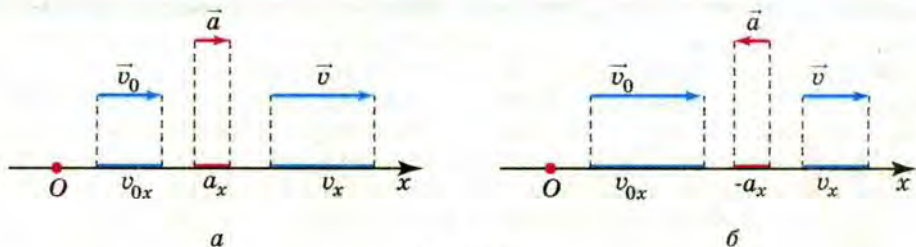
Для спрощення вивчення розглянемо такий нерівномірний рух, під час якого швидкість руху тіла за кожний однаковий інтервал часу збільшується або зменшується на певну сталу величину. Такий рух називають **рівноприскореним**.

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 впливає 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, а, 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 спроекувати вектори на вісь Ox , то вираз набуде вигляду

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (1.15)$$

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

$$l = \frac{v_s^2 - v_{0s}^2}{2a_s}. \quad (1.19)$$

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

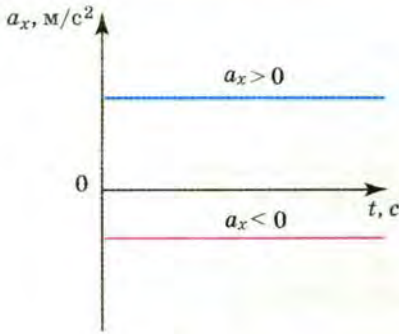
2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

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?

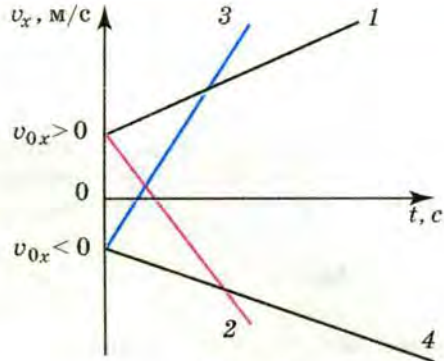
§ 12 ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ

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):

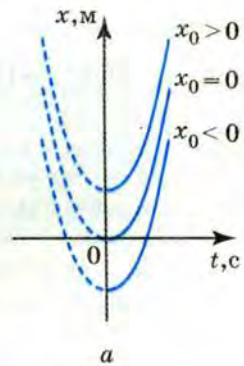
- 1 при $v_{0x} > 0, a_x > 0$;
- 2 при $v_{0x} > 0, a_x < 0$;
- 3 при $v_{0x} < 0, a_x > 0$;
- 4 при $v_{0x} < 0, a_x < 0$.

Якщо $v_{ax} = 0$, 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 здіймається чи спадає графік.

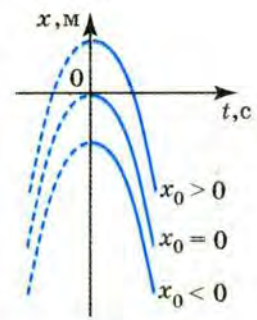
Графік руху тіла $x = x(t)$. Кінематичне рівняння руху є квадратним рівнянням вигляду $y = a + bx + cx^2$:

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

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

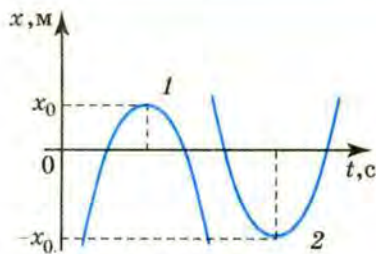


а



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_n називається **абсолютною похибкою** Δa і дорівнює $a - a_n$.

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:

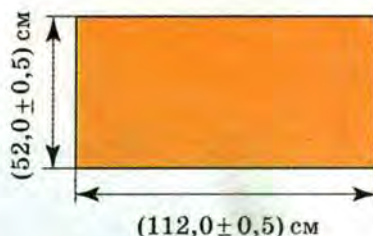
$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100\%.$$

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 $\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$.

Деякі поради.

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:

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

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

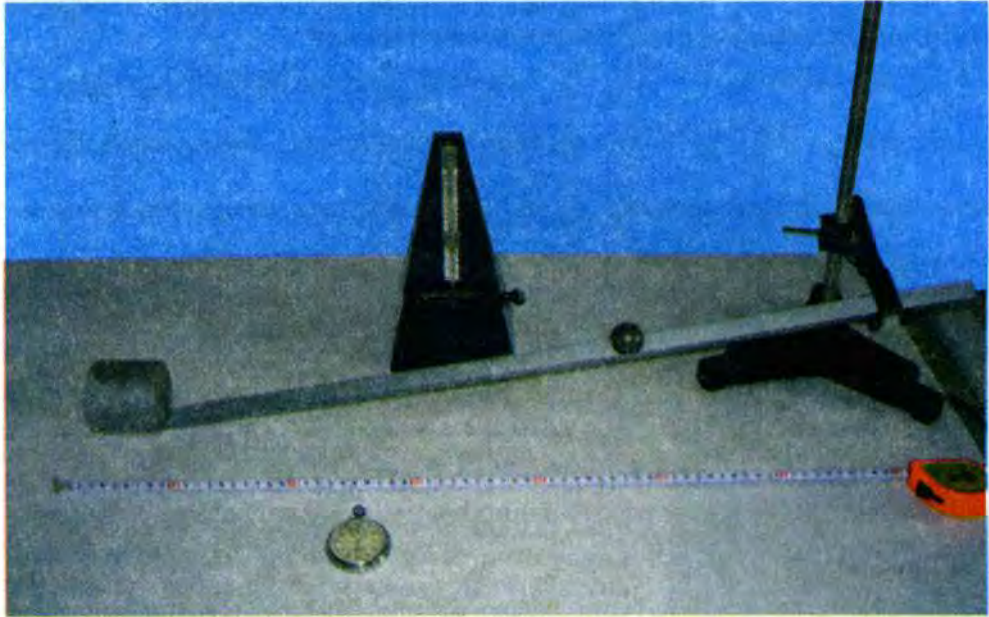
Лабораторна робота №1

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 гирю.

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

Номер досліді	$l, \text{ м}$	$l_{\text{сеп}}, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$t_{\text{сеп}}, \text{ с}$	$a_{\text{сеп}}, \text{ м/с}^2$	$\Delta l, \text{ м}$	$\Delta t, \text{ с}$	$\varepsilon, \%$	$\Delta a, \text{ м/с}^2$

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

Для допитливих

Виконуючи дану лабораторну роботу при незмінному куті нахилу жолоба, два учні отримали такі результати: перший учень: $l_1 = 10 \text{ см}$, $t_1 = 1 \text{ с}$; $l_2 = 30 \text{ см}$, $t_2 = 3 \text{ с}$; другий учень: $l_1 = 15 \text{ см}$, $t_1 = 0,5 \text{ с}$; $l_2 = 60 \text{ см}$, $t_2 = 1 \text{ с}$. 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 перекопати на досліді з товстостінною скляною трубкою довжиною близько 1 м, один кінець якої запаятий, 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 \vec{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». Задовольнився 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 відлустив 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 проєкціях 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, переміщується, 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 ($\bar{a} = \text{const}$).

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.

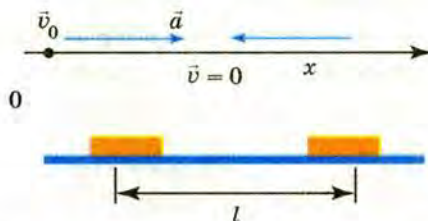
Дано:

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

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

$$v = 0$$

$$a = ? \quad l = ?$$

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:

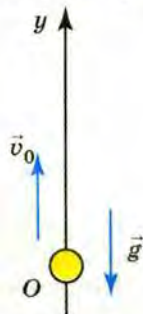
$$v_0 = 40 \text{ м/с}$$

$$t_1 = 2 \text{ с}$$

$$t_2 = 5 \text{ с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

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



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):

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

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

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

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

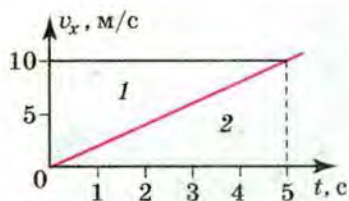
вниз) за формулою $l = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{v_{y2}^2}{2g}$. $l = 1600 \text{ м}^2/\text{с}^2/20 \text{ м/с}^2 + 100 \text{ м}^2/\text{с}^2/20 \text{ м/с}^2 =$

$= 85 \text{ м}$.

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?

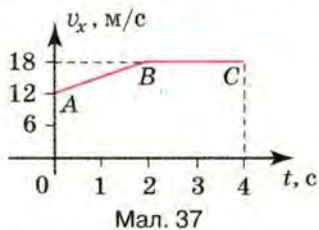


Мал. 36

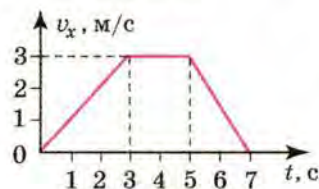
50. На мал. 36 зображені графіки проекцій швидкостей руху двох тіл: 1, 2. Визначте: а) вид руху тіл; б) прискорення руху тіл; в) через скільки секунд після початку руху швидкості тіл будуть однаковими. Запишіть залежність координат тіл від часу.
51. За який час камінь, який почав своє падіння без початкової 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

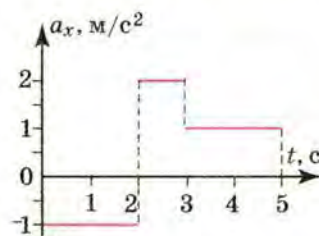
55. Кулька котиться по жолобу без початкової швидкості і за першу секунду проходить 10 см. Який шлях вона пройде за час 3 с? Який шлях вона пройде за третю секунду?
56. За яку секунду від початку рівноприскореного руху тіло пройде шлях, втричі більший за шлях, пройдений за попередню секунду?
57. Через 10 с після початку руху швидкість поїзда дорівнює $0,6 \text{ м/с}$. 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 $19,6 \text{ м/с}$. 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/с², 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 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

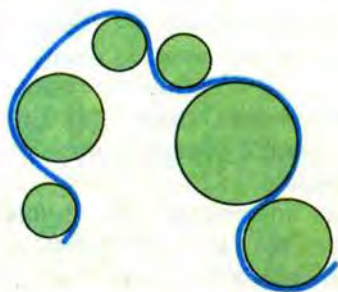
Більш поширеними за прямолінійні є криволінійні рухи, що відбуваються під дією сил, напрямлених під кутом до швидкості. Серед цих рухів виділимо рух матеріальної точки по колу, оскільки цей рух є дуже поширеним у природі і техніці. По колу рухаються різні частини обертових машин. У тракторі, наприклад, 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.



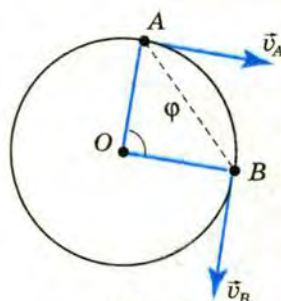
Мал. 40



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 об/хв = 1/60 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:

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

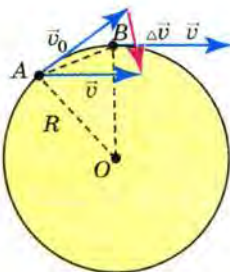
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

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.

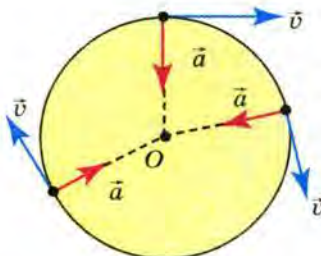
§ 15 ДОЦЕНТРОВЕ ПРИСКОРЕННЯ ТІЛА

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 і 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. Кути 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 $\frac{\Delta v}{t}$ і 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 верстаком, 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:

$$n_1 = 980 \text{ об/хв} = 16,3 \text{ об/с}$$

$$n_2 = 300 \text{ об/хв} = 5 \text{ об/с}$$

$$d_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$d_2 = ? \quad \omega = ?$$

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

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

Відповідь: $d_2 = 0,3 \text{ м}$; $\omega = 31,4 \text{ рад/с}$.

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

Дано:

$$R = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$$

$$n = 600 \text{ об/хв} = 10 \text{ об/с}$$

$$v = ? \quad a = ?$$

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

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

Відповідь: $v = 18,84 \text{ м/с}$; $a = 1183 \text{ м/с}^2$.

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 Єлїї (на півдні Італїї) 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 апорїї Зенона (з грецької *апорїя* — безвихідне становище, неподоланна трудність).

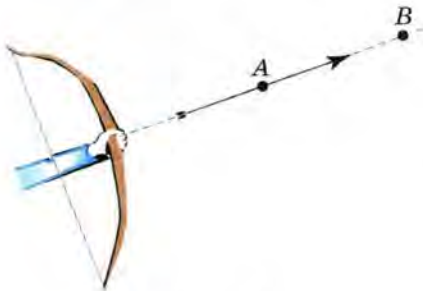
Руху немає... (або про рух взагалі). Щоб пройти відстань, потрібно для початку пройти її половину, а ще раніше потрібно пройти одну четверту частину, і т.д. Продовжуючи поділ навпіл все нових і нових відрізків, ми ніколи не закінчимо цей поділ, а отже, і ніколи не розпочнемо рух.

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: $v_A t =$

$$= v_C t + d. \text{ Звідси знаходимо: } t = \frac{d}{v_A - v_C}.$$



Мал. 46

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

момент, у який вона знаходиться 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 А, 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

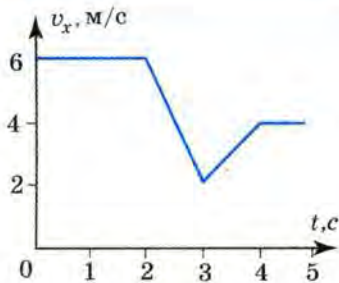
1. Два поїзди рухаються назустріч один одному зі швидкостями 54 та 72 км/год. Пасажир першого потяга помічає, що другий потяг рухається повз нього протягом 4 с. Яка довжина другого потяга?

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.



Мал. 47

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

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.

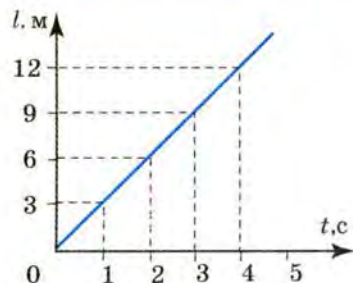
А. 9 м. Б. 6 м. В. 3 м. Г. 12 м. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

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

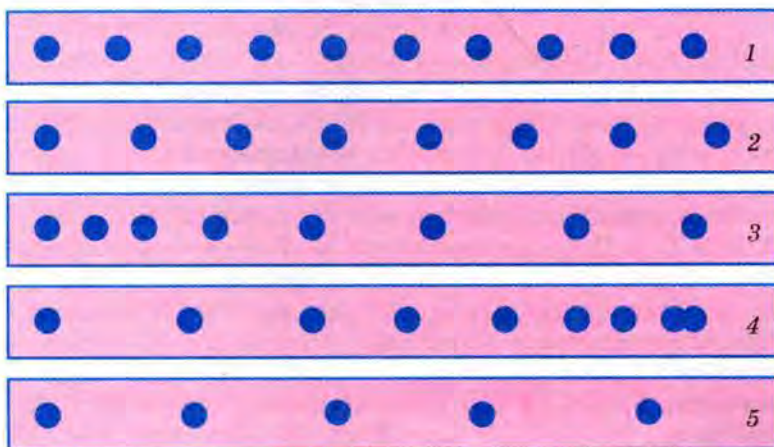
А. 2 м/с. Б. 6 м/с. В. 3 м/с. Г. 12 м/с. Д. Серед відповідей А—Г немає правильної.

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?

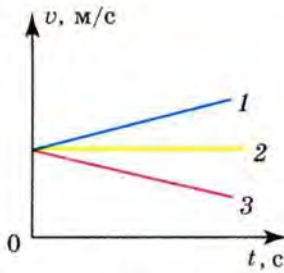
А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.



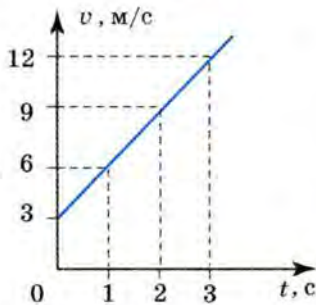
Мал. 48



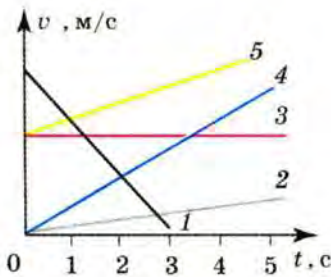
Мал. 49



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?

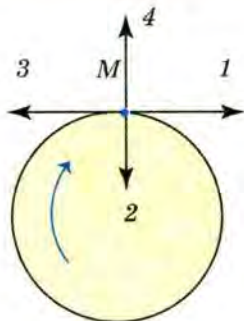
А. Збільшиться у 2 рази.

Б. Зменшиться у 2 рази.

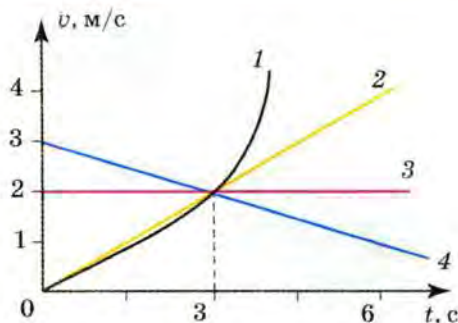
В. Не зміниться.

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.

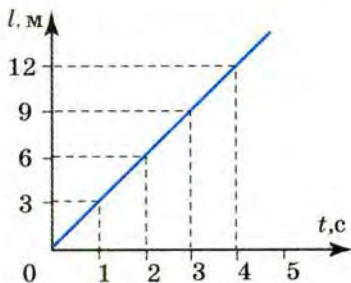
Б. Не можна назвати нерухоме тіло, а також і абсолютно нерухому систему відліку.

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.

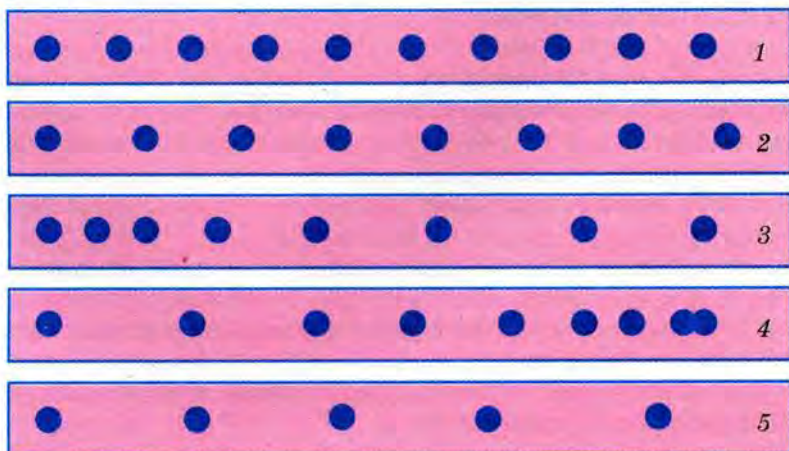
Д. У природі існує безліч інерціальних систем відліку, які «механічно» нічим не відрізняються одна від одної.

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 модулів швидкості від часу для трьох тіл, що рухаються прямолінійно. Який із графіків відповідає рівноприскореному руху тіла, коли напрям його прискорення протилежний напрямку 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 модулів 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.

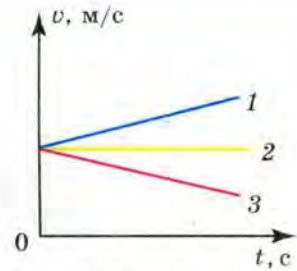
Б. Зменшиться у 2 рази.

В. Не зміниться.

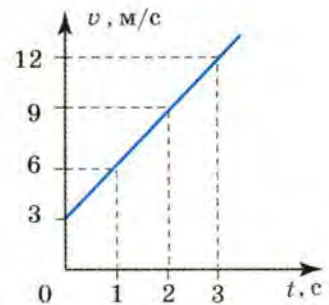
Г. Зменшиться у 4 рази.

Д. Збільшиться у 4 рази.

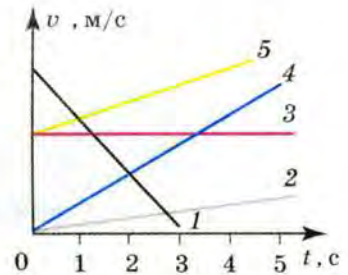
15. На мал. 61 зображені графіки залежності від часу модулів швидкості руху 4 тіл. Яке з цих тіл пройшло найменший шлях за інтервал часу від 0 до 2 с?



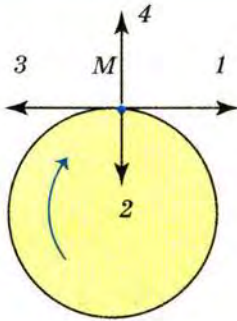
Мал. 57



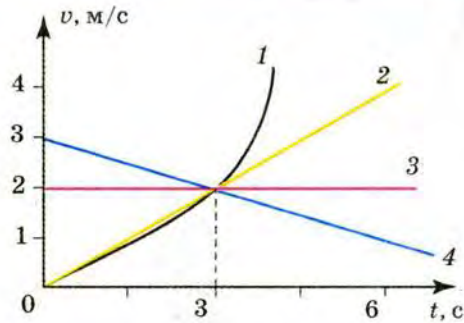
Мал. 58



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.

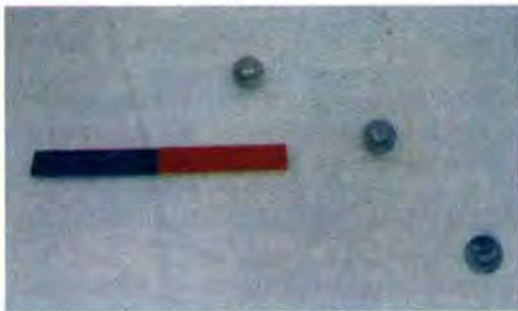
Основою динаміки є закони руху тіл, сформульовані англійським фізиком **І. Ньютоном** (1643—1727) у роботі «Математичні начала натуральної філософії», опублікованій у 1687 р. У цій праці дано визначення основних понять (маса, сила, кількість руху, прискорення), трьох законів механіки, закону всесвітнього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



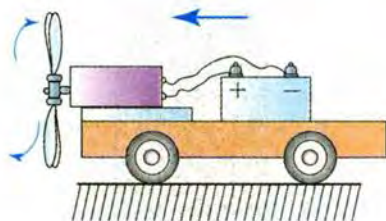
Мал. 64



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**.

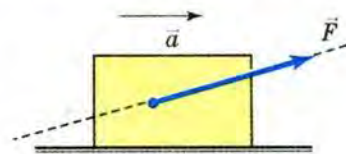
Слід пам'ятати, що термін «сила» завжди пов'язаний із взаємодією тіл і є його кількісною мірою.

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} .

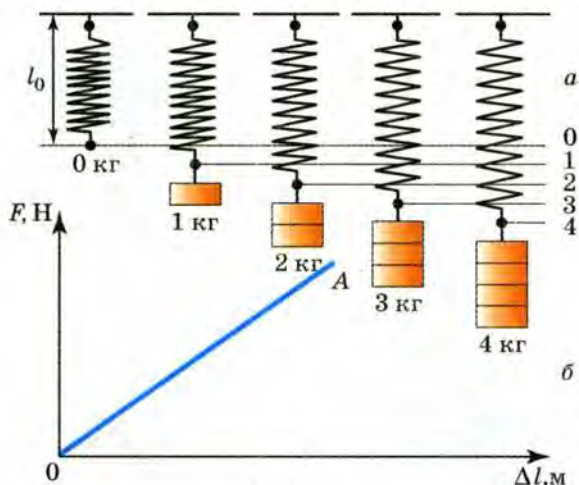
Якщо деяке тіло масою m_1 набуває прискорення \vec{a}_1 , то це викликано тим, що на нього подіяло інше тіло масою m_2 , яке, у свою чергу, також одержує прискорення \vec{a}_2 . Отже, можна записати

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

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 досліди, 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.

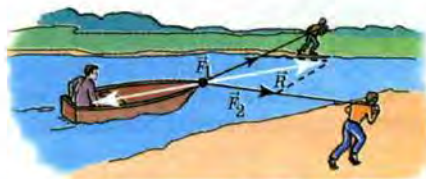
Проте як знайти рівнодійну, коли дві сили (або кілька сил) діють на різні точки твердого тіла (мал. 75, а)? У цьому випадку правило паралелограма застосовувати безпосередньо не можна.

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.

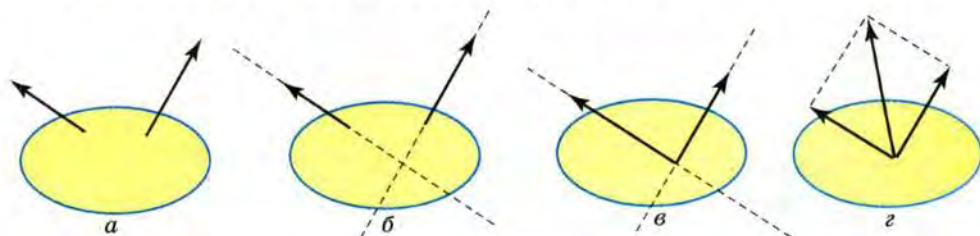
Отже, щоб знайти рівнодійну кількох сил, що діють на різні точки твердого тіла, потрібно: 1) провести лінії дії цих сил (мал. 75, б); 2) перенести точки прикладання сил у точку перетину їх ліній дії (мал. 75, в); 3) знайти



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 цієї 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 рискою шкали. Якщо ж стрілка в процесі вимірювання не збігається з рискою 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.

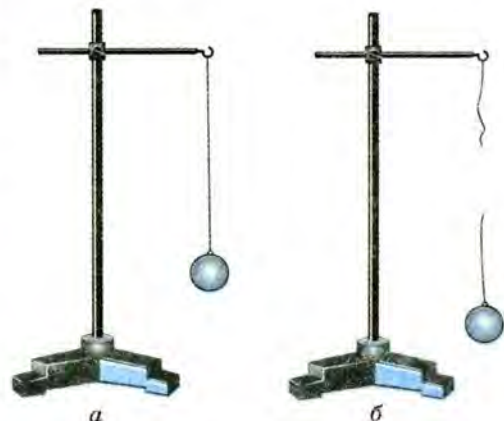
На мал. 76, а зображено кульку, підвішену на гумовому шнурі. Відносно Землі вона перебуває у спокої. Біля кульки є безліч різних тіл: шнур, на якому вона висить, стіни кімнати, предмети у ній і в сусідніх приміщеннях і, звичайно, Земля. Зрозуміло, що не всі ці тіла однаково діють на кульку. Якщо, наприклад, 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.

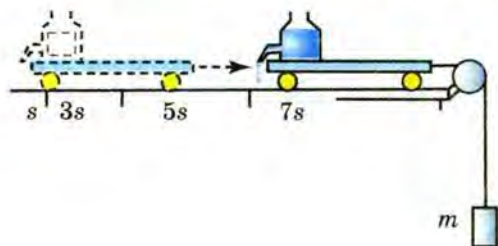
Припустимо, хокеїст ударив по шайбі ключкою. Внаслідок дуже нетривалої дії ключки шайба починає рухатися, набуваючи деякої швидкості. Цікаво, що після удару, коли дія ключки на шайбу вже припинилася, шайба продовжує свій рух. Тим часом після удару вплив на шайбу інших тіл залишився таким же, як і до 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 продовжував би 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.



Мал. 77

Інертність тіл. Візок з крапельницею поставимо на гладенький го-

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.

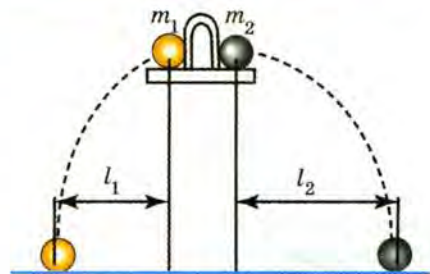
Для характеристики інертності тіл ввели особливу величину — масу тіла, яку прийнято позначати літерою m .

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, повторити 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 достатньо 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 — птолемеєву 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 кувала 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.

В усіх 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».

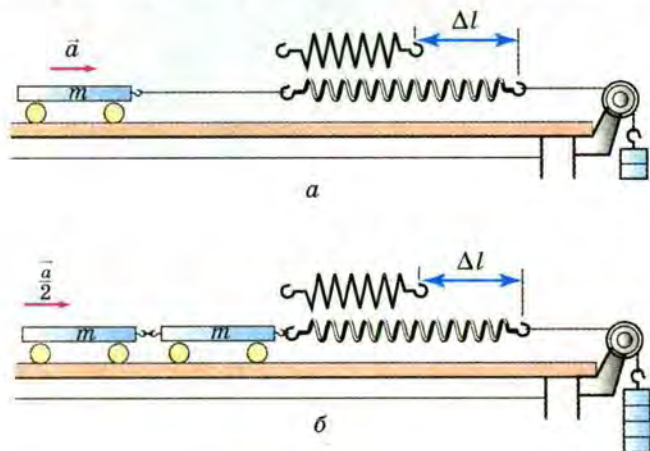
§ 20 ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

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.

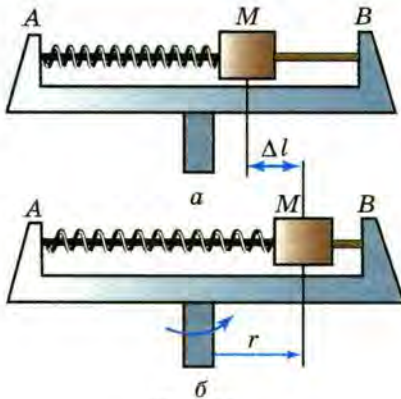
Для проведення досліду вибираємо тіло, яке діє на всі інші тіла з однаковою силою. Таким тілом може слугувати розтягнута або стиснута пружина, в якій виникає сила пружності. Від усіх інших сил сила пружності відрізняється певною особливістю, вона залежить тільки від того, наскільки розтягнута або стиснута 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, перекинutoї 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

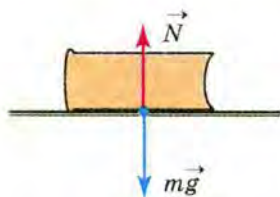
Кожен із законів Ньютона поступово розкриває зміст одного з найважливіших понять механіки — поняття сили. Якщо другий закон стверджує, що кожна сила викликає прискорення, то третій закон говорить, що всі сили носять характер взаємодій.

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

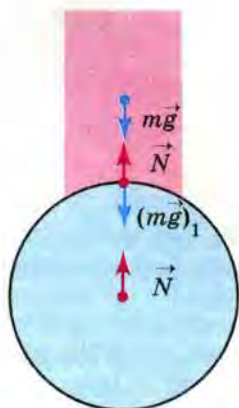
Наприклад, на столі лежить книга (мал. 82). З якою вона діє на стіл $\vec{F} = m\vec{g}$, з такою ж за значенням силою стіл діє на книгу \vec{N} . Математично це записують так:

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

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 також 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).

Виявилося, 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?

Задачі 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:

$$\alpha = 45^\circ$$

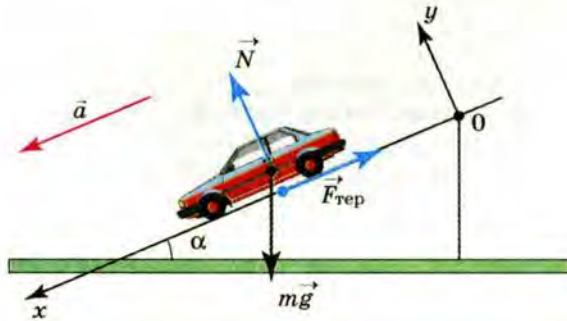
$$\mu = 0,4$$

$a = ?$

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 напрямком 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:

$$m_1 = 0,2 \text{ кг}$$

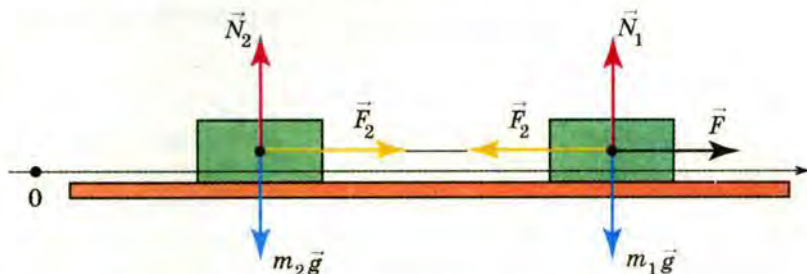
$$m_2 = 0,3 \text{ кг}$$

$$F = 1 \text{ Н}$$

$$a - ?$$

$$F_1 - ?$$

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: $F = -121 \text{ кН}$.

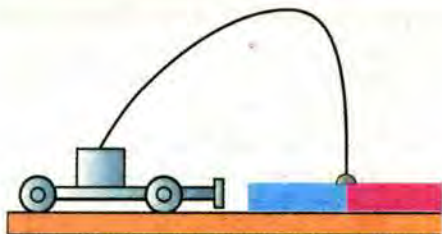
Рівень А

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 $2,8$ рази 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, підвішеного 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 слабке.

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).

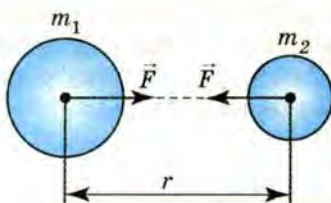
Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою особливого виду матерії, який називається **гравітаційним полем**. Таке поле існує навколо будь-якого тіла, чи то планета, камінь, людина або аркуш паперу. При цьому гравітаційне поле, створене тілом, діє на будь-яке інше тіло так, що у того з'являється 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 слабке, 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 зв'язуючи 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 в 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 власти 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)».

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

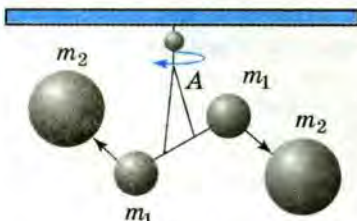
1. Яку взаємодію називають гравітаційною?
2. За допомогою чого здійснюється гравітаційна взаємодія?
3. Назвіть властивості гравітаційного поля.
4. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння. Для яких тіл він справедливий?
5. Що слід розуміти під r у формулі $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ при розрахунку сили 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,



Мал. 86

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.

2 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.

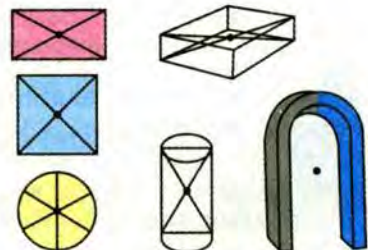
§ 24 СИЛА ТЯЖІННЯ

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

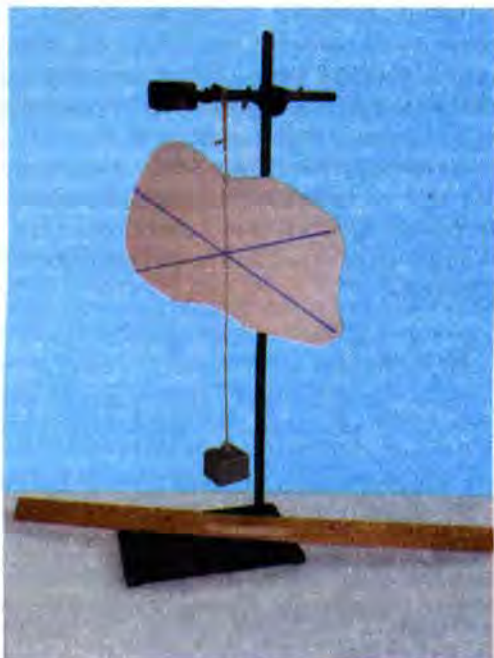
$$F_{\text{тяж}} = G \frac{Mm}{R^2}, \quad (2.14)$$

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 вимірними 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 зрівноважені, 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.

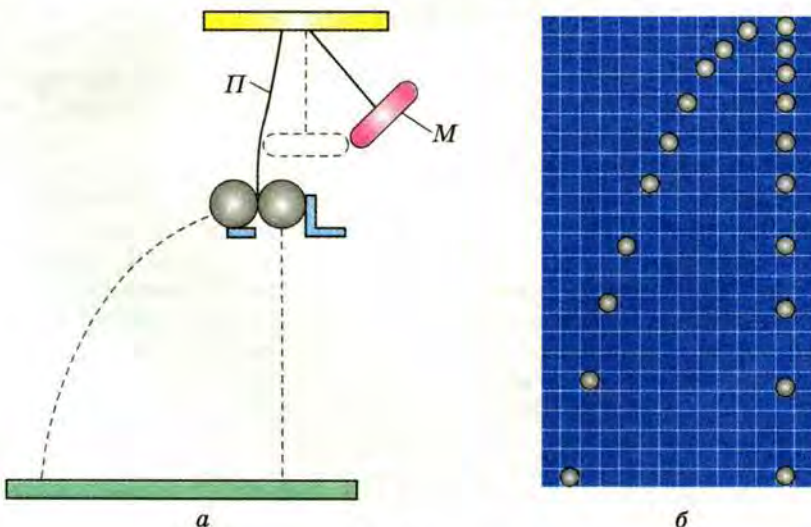
Важільні терези — дуже чутливий прилад. Найменша маса, яку можна виміряти найчутливішими терезами, становить кілька мільярдних часток кілограма.

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

ходитьсь 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 $l = \frac{at^2}{2}$. Замінюючи l на h і a на g , перепишемо цю формулу у вигляді $h = \frac{gt^2}{2}$, звідки після нескладних перетворень отримаємо $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

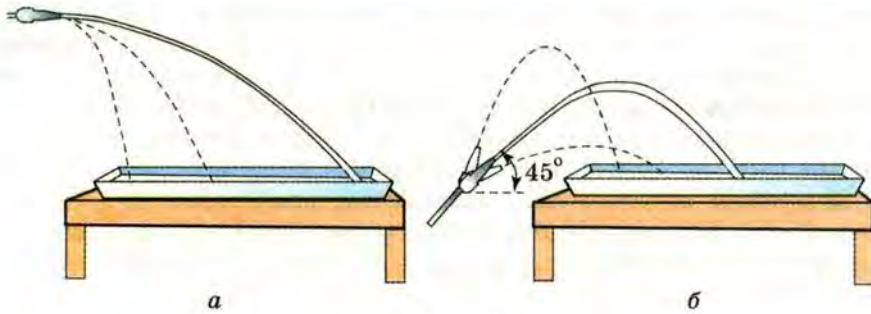
Такий самий час знаходитиметься у польоті і тіло, кинуте з тієї ж висоти в горизонтальному напрямі. У цьому випадку, згідно з Галілеєм, «до рівномірного безперешкодного руху приєднується інший, зумовлений силою тяжіння, внаслідок чого виникає складний рух, що складається з рівномірного горизонтального 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 заздалегідь накресленими на ньому параболіями. 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 впливає 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 $3,5$ км.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

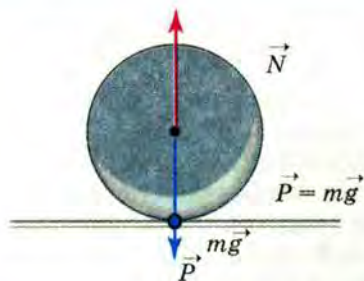
1. Яка куля впаде на Землю раніше: та, що вилетіла при пострілі з горизонтально розташованої рушниці або випадково упущена з тієї самої висоти у момент пострілу з рушниці?
2. Від чого залежить дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямі? По якій траєкторії рухається таке тіло?
3. Від чого 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

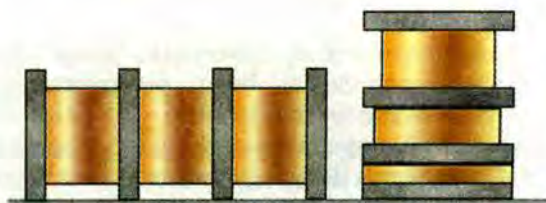
Нехай яке-небудь тіло, наприклад куля, лежить на горизонтальній опорі (мал. 91). Куля взаємодіє із Землею, і якби не було опори, то під дією сили тяжіння вона падала б на Землю з прискоренням g . Але падінню кулі перешкоджає опора.

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 стоячої конструкції нижні поверхи (поролоніві 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 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 у 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, пасажери 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 повернути 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 впав би 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.



Мал. 95

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

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}. \quad (2.22)$$

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, навколоземного 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 навколоземних 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, отримаємо

$$M = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 (6,37 \cdot 10^6 \text{ м})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}} \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

Маса Землі дорівнює майже шести мільйонам мільярдів кілограмів!
В і д п о в і д ь: $M \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

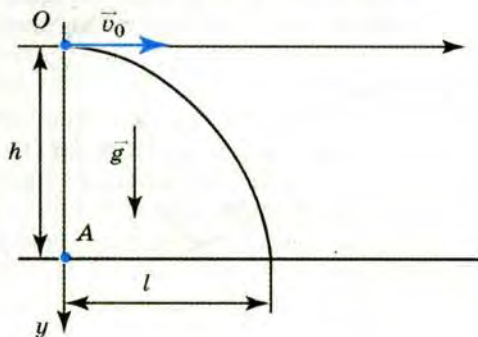
2. Літак летить горизонтально зі швидкістю 360 км/год на висоті 490 м. Коли він пролетів над точкою А, з нього кинули пакет. Скільки часу падав пакет і на якій відстані від точки А він упав на Землю? Опором повітря знехтувати.

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 ваги 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 кинуто 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?

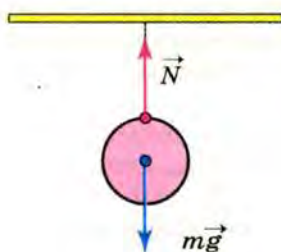
144. У скільки разів зменшується сила притягання до Землі космічної ракети під час її віддалення від поверхні Землі на відстань, що дорівнює радіусу Землі?
145. У скільки разів сила гравітаційного притягання на Марсі менша, ніж на Землі, якщо маса Марса становить 0,117 маси Землі, а його радіус дорівнює $3,4 \cdot 10^3$ 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/см^3 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.

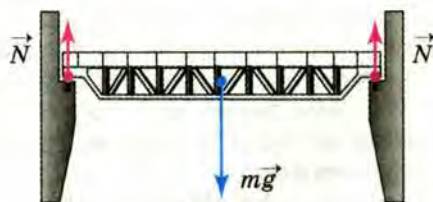
§ 28 СИЛА РЕАКЦІЇ ОПОРИ. СИЛИ ПРУЖНОСТІ

Сила реакції опору. 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.

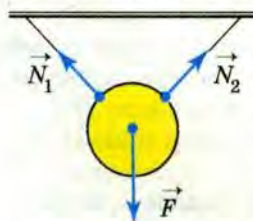


Мал. 98

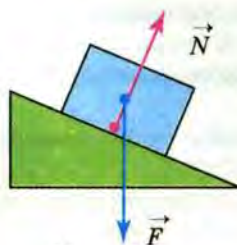


Мал. 99

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 опору**.



Напрямок сили реакції опору визначається діючими на опору силами. У тому випадку, коли відсутні сили тертя (ідеальна опора), сила реакції опору напрямлена перпендикулярно до поверхні стичних тіл у точці їх дотику. На мал. 100 наведено приклади сили реакції опору.



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.

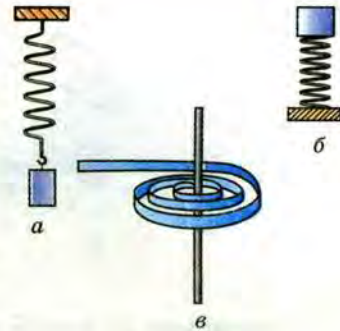
Як ви вже знаєте з 8 класу, за законом Гука абсолютна (пружна) деформація пропорційна прикладеній до тіла силі. Отже, і сили пружності пропорційні абсолютній деформації: чим більша деформація тіла, тим більші сили пружності. Математично це можна записати так: $F_{\text{пр}} \sim \Delta l$. При переході 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

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке сила реакції опори?
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

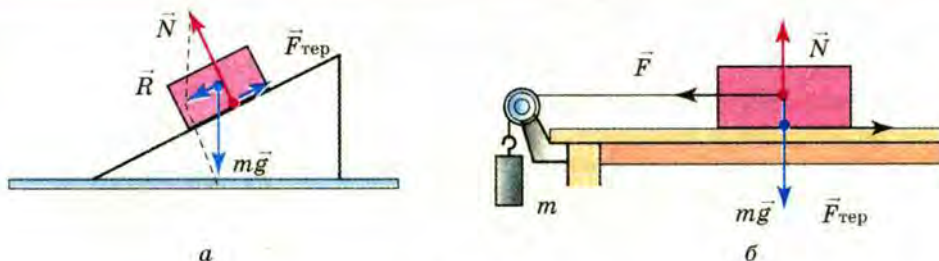
Сила тертя спокою. Під час руху тіл між ними виникають сили тертя.

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: $F_{\text{терп}} \sim N$.

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: $F_{\text{терп}} \sim \mu_0$.

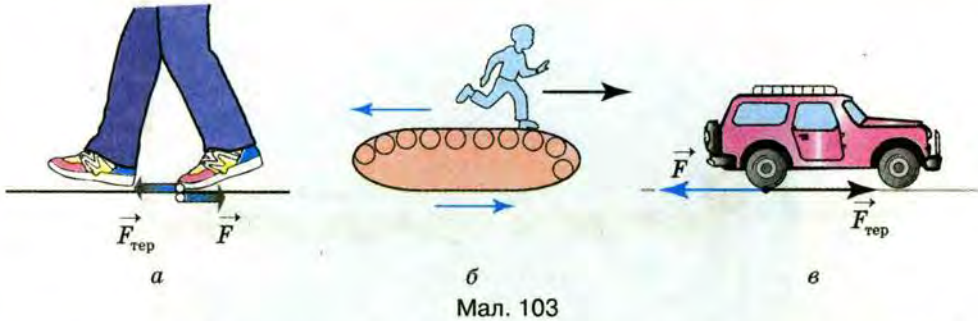
Величину μ_0 називають **коефіцієнтом тертя спокою**.

Таким чином, максимальна сила тертя спокою залежить від сили тиску N і матеріалів дотичних поверхонь:

$$F_{\text{терп}} = \mu_0 N. \quad (2.24)$$

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 $F_{\text{терп}}$, що діє на підшву 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 $F_{\text{тер}}$, 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.

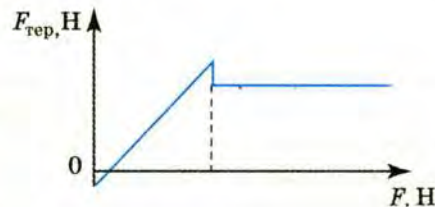
Так само, як і максимальна сила тертя спокою, сила тертя ковзання пропорційна силі тиску (силі реакції опори) і залежить від матеріалу дотичних поверхонь:

$$F_{\text{тер}} = \mu_{\text{ковз}} N. \quad (2.25)$$

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 досліді 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 вимірємо 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

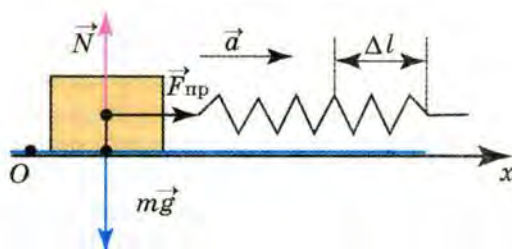
Розв'язуємо разом

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

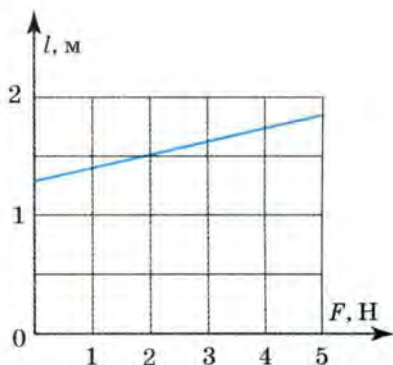
163. Гиря стоїть на столі. Які сили зрівноважуються?
164. Коли до гумового шнура підвісили гирю, він подовжився. Назвіть сили взаємодії. До яких тіл прикладені сили?
165. Дріт завдовжки 5,4 м під дією навантаження подовжився на 27 мм. Визначте абсолютне видовження дроту.
166. Які сили треба прикласти 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 видовжилась 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.



Мал. 107

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 досліду, 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.

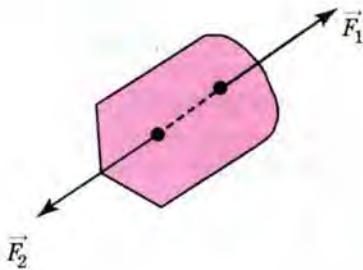
189. При якому мінімальному коефіцієнті тертя між взуттям і біговою доріжкою спортсмен може пробігти зі старту 100 м за 10 с, прискорю-

- 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 троллейбуса під час руху, якщо вважати рух рівноприскореним і силу опору прийняти рівною 0,02 маси троллейбуса?
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.

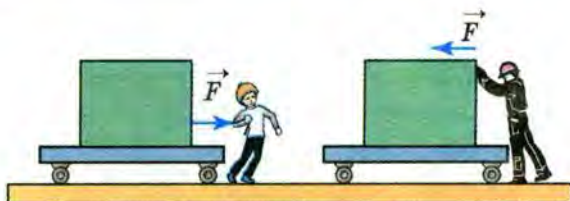
Щоб тіло, яке може рухатися поступально (без обертання), перебувало в рівновазі, необхідно, щоб геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнювала нулю.



а



б



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).

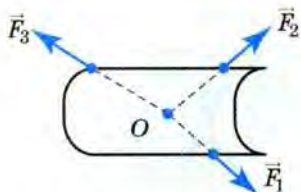
Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не дорівнює нулю, то для того, щоб тіло перебувало в стані рівноваги, до нього повинна бути прикладена додаткова сила, що дорівнює за модулем рівнодійній, але протилежна їй за напрямом.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

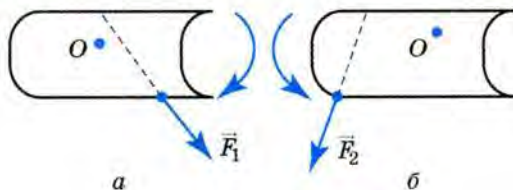
1. Що означає вираз: тіло (або система тіл) перебуває в стані рівноваги?
2. До тіла прикладено декілька сил, рівнодійна яких не дорівнює нулю. Що потрібно зробити, щоб тіло опинилося в стані рівноваги?
3. У чому полягає умова рівноваги тіл, що рухаються поступально?
4. Чи означає рівновагу стан спокою 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

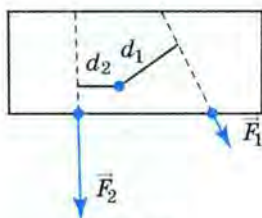
Вище ми з'ясували умови рівноваги тіла за відсутності його обертання. Проте як забезпечується відсутність обертання тіла?



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 зрівноважена 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} 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, 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 обертального 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:

$$\begin{aligned} F_1 d_1 = F_2 d_2 \text{ або } F_1 d_1 - F_2 d_2 = 0; \\ M_1 = M_2, \text{ або } M_1 - M_2 = 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

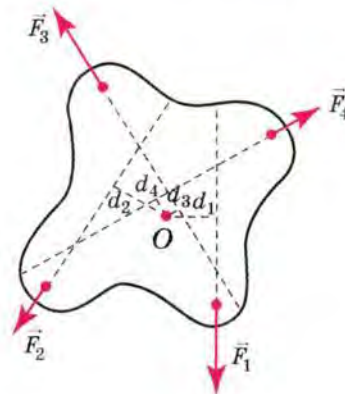
Тіло, здатне обертатися навколо закріпленої осі, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю.

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.

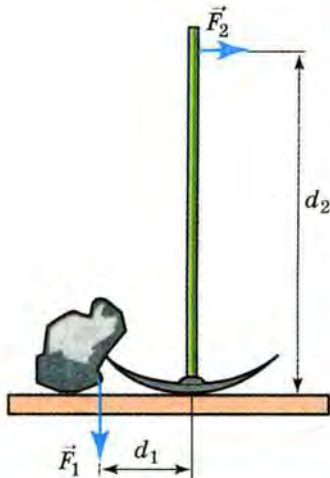


а



б

Мал. 114



Мал. 115

З малюнка видно, що моменти сил \vec{F}_1 і \vec{F}_4 відносно осі обертання тіла додатні, а моменти сил \vec{F}_2 і \vec{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 випливає 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 \vec{F}_1 і \vec{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).

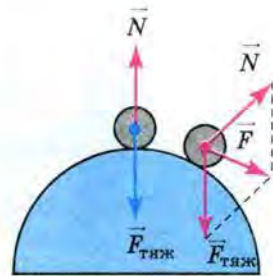
Виявляється, що причина, через яку кулька втрачає стійкість, — це найменше відхилення тіла від положення рівноваги. На мал. 116 видно, що, як тільки кулька на випуклій підставці покинула своє місце, сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ перестає врівноважуватися силою реакції опори \vec{N} (сила \vec{N} , 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.

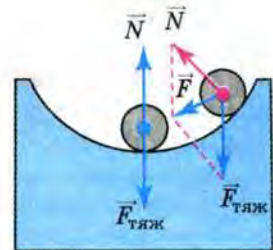
Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від рівноважного положення рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги.

Рівновага нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.

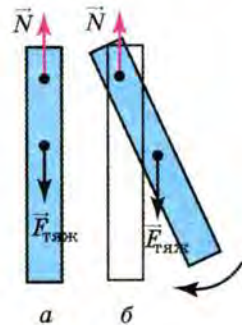
Це справедливо і для тіла, що має вісь обертання. Як приклад такого тіла розглянемо звичайну лійку, закріплену на стержні, що проходить через отвір по-



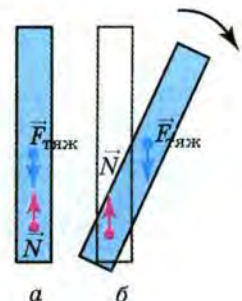
Мал. 116



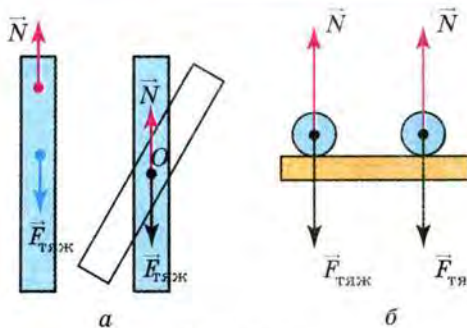
Мал. 117



Мал. 118



Мал. 119



Мал. 120

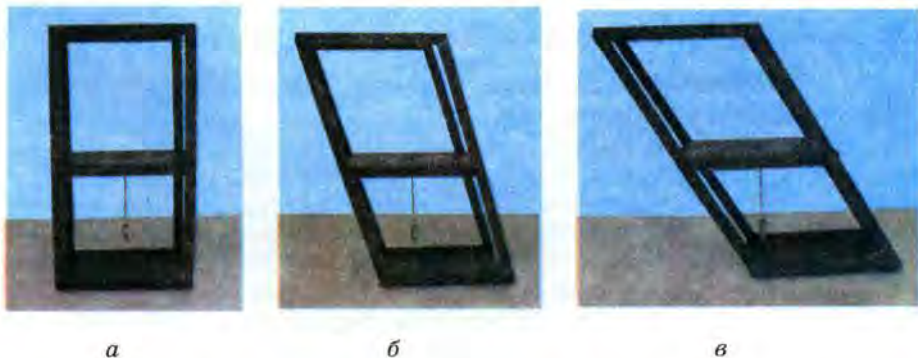
Якщо кулька перебуває в положенні нестійкої рівноваги (мал. 116), то її центр тяжіння вищий, ніж у будь-якому іншому положенні. Навпаки, у кульки на вгнутій опорі центр тяжіння в положенні стійкої рівноваги (мал. 117) нижчий, ніж у будь-якому із сусідніх положень. Отже, для стійкої рівноваги центр тяжіння 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, а), 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 $F_{\text{тяж}}$ і сила реакції з боку опори 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

близу її кінця. Положення лінійки, показане на мал. 118, а, б, є стійким. Підвісити ту саму лінійку на стержні так, як це показано на мал. 119, а, 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, а, нестійка.

Стійке і нестійке положення рівноваги відрізняються одне від одного ще й положенням центра тяжіння тіла.

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.

2 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

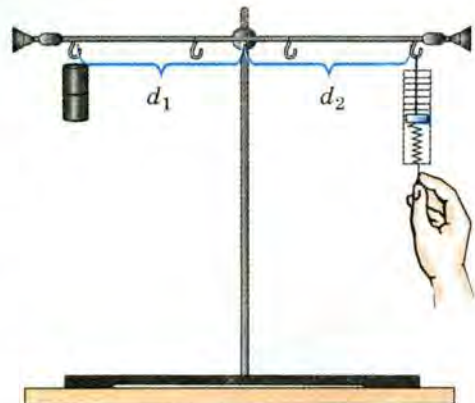
Мета роботи: встановити співвідношення між моментами сил, які прикладені до плечей важеля під час рівноваги.

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.

$d, \text{ м}$	$\Delta d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$\Delta d_2, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$\Delta m, \text{ кг}$	$g, \text{ м/с}^2$	$\frac{\Delta g}{g}, \%$	$F, \text{ Н}$	$\frac{\Delta F}{F}, \%$	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\frac{\Delta M_1}{M_1}, \%$	$\frac{\Delta M_2}{M_2}, \%$	$\frac{M_1}{M_2}$

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 рівнодіяна 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.

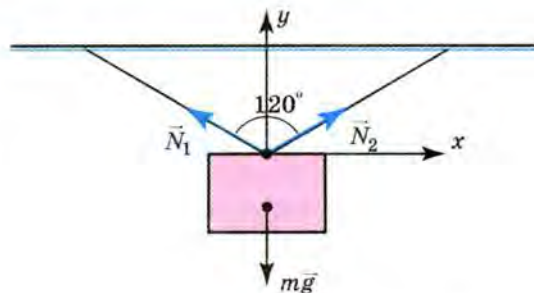
Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$2\varphi = 120^\circ$$

$$N_1 = ? \quad N_2 = ?$$

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 сталю 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 довелося 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 у 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

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2. \quad (2.34)$$

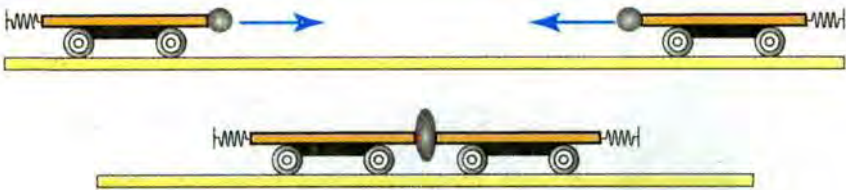
У лівій частині цієї рівності знаходиться сума початкових імпульсів двох тіл, а в правій — сума імпульсів тих же тіл через час t . Ці суми дорівнюють одна одній. Отже, хоча імпульс кожного з тіл при взаємодії змінюється, їх повний імпульс, тобто сума імпульсів обох тіл, зберігається незмінною. Що і потрібно 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 врівноважувалися). 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 проекцій цих імпульсів на координатні осі також залишається сталою. Внаслідок цього геометричне додавання імпульсів можна замінити алгебраїчним додаванням їх проекцій.

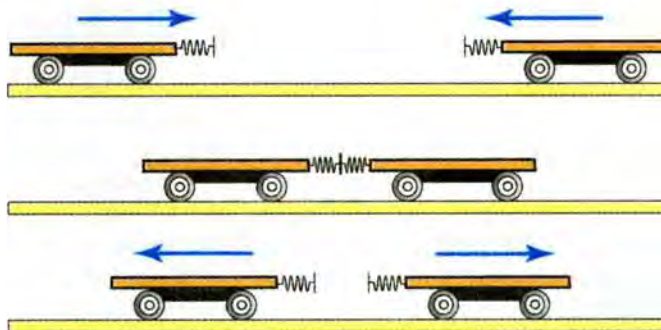
Закон збереження імпульсу можна проілюструвати такими простими дослідями.

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 трубчастю 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 протилежному 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

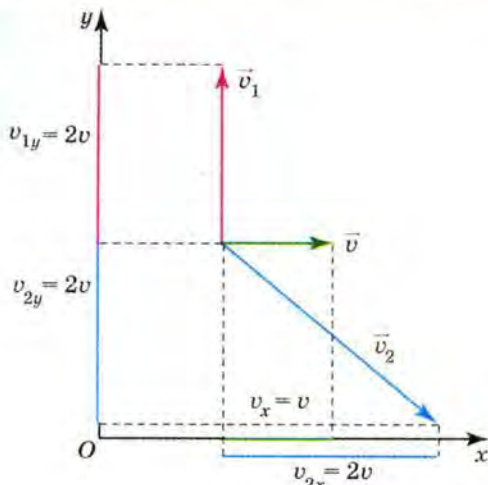
Під час розв'язування задач використовуйте алгоритм застосування закону збереження імпульсу, який містить у собі такі етапи:

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 проєкціях 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.



Розв'язання.

Оскільки під час вибуху снаряда виникають великі внутрішні сили і час їх дії дуже малий, то зовнішньою силою тяжіння можна знехтувати і вважати систему на час вибуху замкнутою. За законом збереження імпульсу:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \text{ або } m\vec{v} = \frac{1}{2}m\vec{v}_1 + \frac{1}{2}m\vec{v}_2.$$

Перепишемо це рівняння у проєкціях на координатні осі:

$$Ox: 2v_x = v_{1x} + v_{2x};$$

$$Oy: 2v_y = v_{1y} + v_{2y}.$$

Враховуючи, що за умовою задачі $v_{1x} = 0$, $v_{1y} = v_1 = 2v$; $v_y = 0$, $v_x = v$, отримуємо $v_{2x} = 2v$, $v_{2y} = -2v$.

$$\text{Тоді } v_2 = \sqrt{v_{2x}^2 + v_{2y}^2} = 2v\sqrt{2}; \text{ tg } \alpha = 1, \alpha = 45^\circ.$$

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:

$$m_1 = 50 \text{ кг}$$

$$m_2 = 150 \text{ кг}$$

$$u = 0,6 \text{ м/с}$$

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

Розв'язання

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 проєкція імпульсу човна на вісь Ox дорівнює $m_2 v_2$, а імпульсу хлопчика $-m_1 v_1$, 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:

$$m_2 v_2 - m_1 (u - v_2) = 0.$$

Звідси швидкості човна і хлопчика відносно води мають вигляд

$$v_2 = \frac{m_1 u}{m_1 + m_2}, \quad v_2 = \frac{50 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ м/с}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,15 \text{ м/с};$$

$$v_1 = u - v_2 = u - \frac{m_1 u}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 u}{m_1 + m_2}, \quad v_1 = \frac{150 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ м/с}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,45 \text{ м/с}.$$

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 м^3 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.

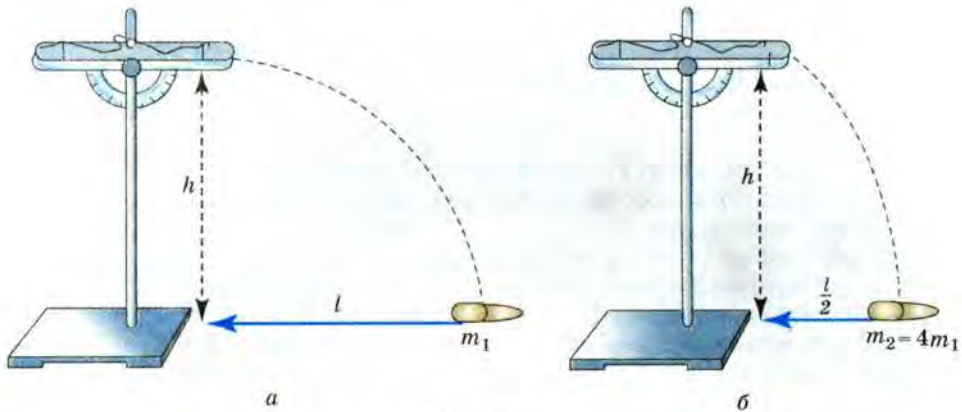
Перед фізиками постало завдання: знайти **фізичну величину, яка є мірою механічного руху і яка зберігається при будь-яких перетвореннях механічного руху в інші форми руху матерії.**

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:

$$m_2 = 4m_1, v_2 = \frac{1}{2}v_1, m_2v_2^2 = 4m_1\left(\frac{v_1}{2}\right)^2 = m_1v_1^2. \quad (2.37)$$

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:

$$m_1v_1^2 = m_2v_2^2 = \dots = m_nv_n^2. \quad (2.38)$$

Отже, величина mv^2 може слугувати кількісною мірою поступального руху тіл при взаємних перетвореннях поступального механічного руху з іншими формами руху.

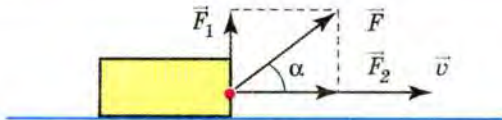
У фізиці як кількісна міра поступального механічного руху при виникненні його з інших форм руху або перетворенні на інші форми руху взята величина, що дорівнює половині добутку маси тіла і квадрата швидкості його руху:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.39)$$

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 направлені паралельно напрямку швидкості \vec{v} і перпендикулярно до її напрямку (мал. 127).

Під дією сили \vec{F}_1 , направленої 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 $\Delta E_k = Fl \cos \alpha$.

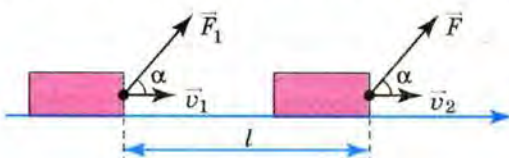
Отже,

$$A = Fl \cos \alpha. \quad (2.43)$$

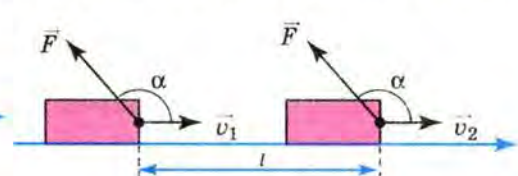
Якщо сила направлена під кутом α до напрямку швидкості руху тіла, то робота дорівнює добутку модуля сили F , шляху l і косинуса кута α між векторами сили \vec{F} і швидкості \vec{v} .

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:

$$A = -mgh, \quad (2.46)$$

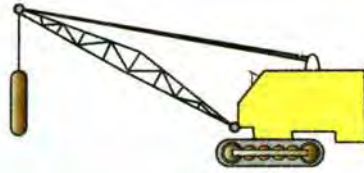
потенціальна енергія при цьому збільшується від нуля до значення mgh .

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):

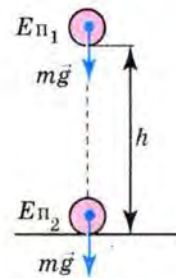
$$E_n = mgh. \quad (2.47)$$

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):

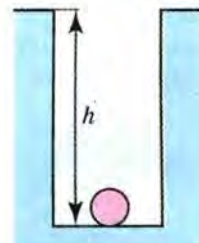
$$E_n = -mgh. \quad (2.48)$$



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_n , що при зміні швидкості поступального руху тіла під дією сил пружності зменшується рівно на стільки, на скільки зростає кінетична енергія тіла E_k :

$$\Delta E_n = -\Delta E_k. \quad (2.49)$$

З виразів $\Delta E_n = -\Delta E_k$ і $A = \Delta E_k$ випливає, що зміна потенціальної енергії ΔE_n пружно деформованого тіла дорівнює роботі сил пружності A , взятої з протилежним знаком:

$$\Delta E_n = -A. \quad (2.50)$$

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

$$A = F_{\text{сеп}} \Delta x = -k \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) (x_2 - x_1) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}. \quad (2.52)$$

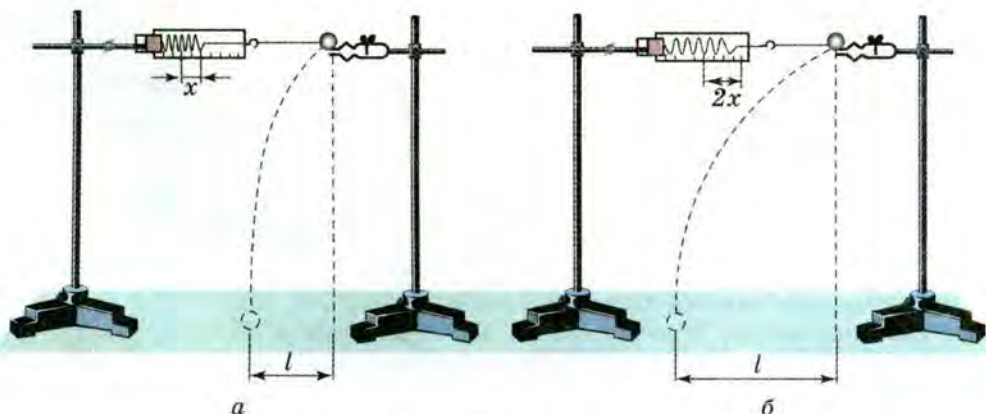
Зміна потенціальної енергії пружини:

$$E_{n2} - E_{n1} = \Delta E_n = -A = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}. \quad (2.53)$$

Потенціальна енергія E_n пружно деформованого тіла дорівнює половині добутку його жорсткості k і квадрата деформації x :

$$E_n = \frac{kx^2}{2}. \quad (2.54)$$

У справедливості цього висновку можна переконатися на досліді. Закріпимо горизонтально динамометр із сталевією пружиною, прикріпимо один кінець нитки до гачка динамометра, а до іншого прив'яжемо кулю (мал. 133, а). Розташуємо кулю на одній горизонтальній прямій з пружи-



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 $E_n = \frac{kx^2}{2}$ 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_n ; вона залежна від координат тіла, а зміна її дорівнює зміні кінетичної енергії тіла, взятій з протилежним знаком:

$$\Delta E_n = -\Delta E_k. \quad (2.55)$$

Отже, сума змін кінетичної і потенціальної енергій тіл, які взаємодіють гравітаційними силами і силами пружності, дорівнює нулю:

$$\Delta E_k + \Delta E_n = 0. \quad (2.56)$$

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:

$$E = E_k + E_n. \quad (2.57)$$

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**:

$$E = E_k + E_n = \text{const}. \quad (2.58)$$

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 згоряння 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.

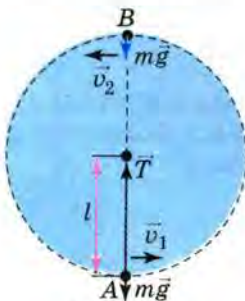
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

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.

Задачі 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.

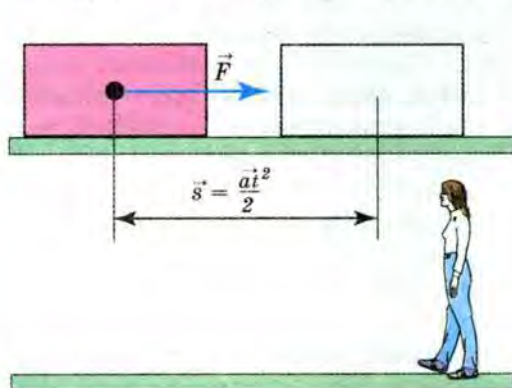
Якщо в одній інерціальній системі відліку механічна енергія замкнутої системи тіл змінюється, наприклад частина її витрачається на нагрівання, то і в будь-яких інших системах, що рухаються відносно першої рівномірно і прямолінійно, відбудеться така сама зміна механічної енергії.

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.

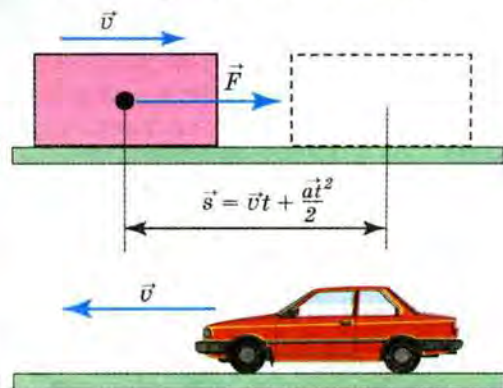
2. На нерухоме відносно Землі тіло масою m діє стала сила \vec{F} . Порівняйте зміни кінетичної енергії тіла за час t дії сили в системах відліку, пов'язаних із Землею і з автомобілем, що рухається зі швидкістю \vec{v}_0 у напрямі, протилежному напрямку сили.

Р о з в' я з а н н я.

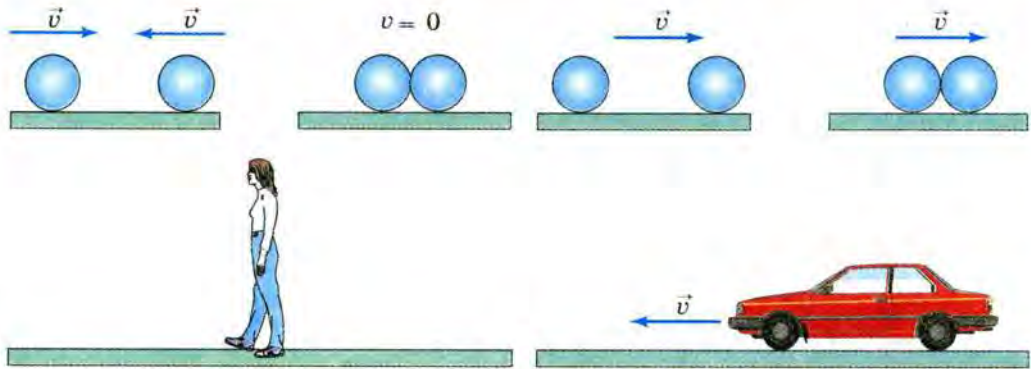
Відносно Землі (мал. 135) зміна кінетичної енергії тіла має вигляд



Мал. 135



Мал. 136



Мал. 137

Мал. 138

$$\Delta E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{m}{2}(at)^2 = \frac{F^2 t^2}{2m};$$

відносно автомобіля, який рухається зі швидкістю \bar{v} у напрямі, протилежному дії сили (мал. 136), зміна кінетичної енергії тіла така:

$$\Delta E'_{\kappa} = \frac{m}{2}(v_0 + at)^2 - \frac{m}{2}v_0^2 = Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Таким чином, для незамкнених систем тіл навіть зміна механічної енергії в різних інерціальних системах відліку має вигляд $\Delta E_{\kappa} \neq \Delta E'_{\kappa}$.

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 \bar{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: $A = \Delta E_{\kappa}$, $A' = \Delta E'_{\kappa}$.

3. У замкнених системах тіл діють внутрішні неконсервативні сили, кінетична енергія системи тіл змінюється, але зміна цієї енергії ΔE_{κ} у різних інерціальних системах відліку однакова. Доведемо це за допомогою прикладу.

Дві кулі однакової маси рухаються назустріч одна одній з однаковими за модулем швидкостями \bar{v} . Порівняйте зміни кінетичної енергії ΔE_{κ} , 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:

$$\Delta E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - 2\frac{mu^2}{2}.$$

Швидкість руху куль після удару u визначимо, застосувавши закон збереження імпульсу для проєкцій на напрям руху куль: $mv - mv = 2mu$, звідки $u = 0$ і $\Delta E_{\kappa} = mv^2$.

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 п 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 гири 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, збільшилась 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

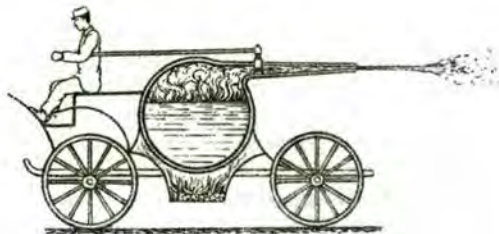
Розвиток вчення про реактивний рух. Ще за 120 р. до н. е. **Герон Олександрійський** сконструював перший (відомий на даний час в історії) реактивний двигун — *еоліпил* (мал. 139). Двигун Герона жерці майстерно використовували для відкривання та закривання дверей храму.

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 особливий 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 жахливі «птахи» хмарами неслися на міста, викликаючи пожежі.

Реактивні снаряди використовувалися при обороні Севастополя, а реактивна артилерія була на озброєнні середньоазіатських 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 проєкт 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 тяжінням 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. Спроєктований Ціолковським снаряд мав витягнуту обтічну форму. У його головній частині розміщувався екіпаж та прилади керування, а майже увесь інший простір заповнювався паливом — 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 виводить основне рівняння польоту ракети, розглядає енергетично найекономніші

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 прямолінійній дорозі рівномірно рухається автомобіль з працюючим двигуном. Чи не протирічить це першому закону Ньютона?
2. Напрямок вектора якої фізичної величини залежить від напряму 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 енергіях тіла, піднятого над Землею, і пружно деформованого тіла?
12. Чому при дії сили тертя закон збереження механічної енергії порушується?

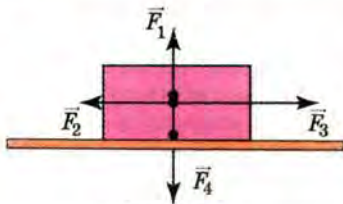
Що я знаю і вмію робити

Я знаю, які є системи відліку

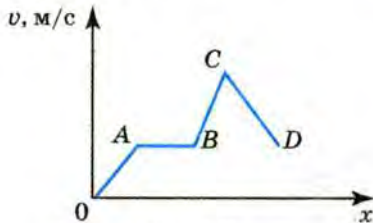
1. Із залізничним складом пов'язана система відліку. В яких випадках вона буде інерціальною: а) поїзд стоїть на станції; б) поїзд відходить від станції; в) поїзд наближається до станції; г) поїзд рухається рівномірно на прямолінійній ділянці залізниці?

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 нехтувати.

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 напрями швидкості \vec{v} і прискорення \vec{a} м'яча. Який з наведених на малюнку 144, б напрямів 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?

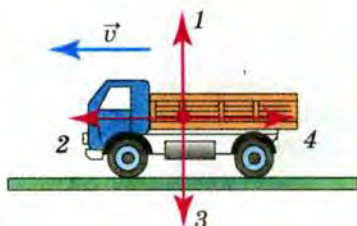
А. Рівномірно, зі швидкістю 2 м/с.

Б. Рівноприскорено, з прискоренням 2 м/с².

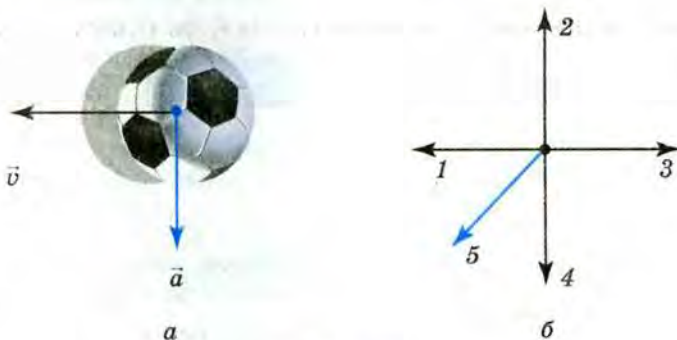
В. Рівноприскорено, з прискоренням 0,5 м/с².

Г. Рівномірно, зі швидкістю 0,5 м/с.

Д. Рівноприскорено, з прискоренням 8 м/с².



Мал. 143



Мал. 144

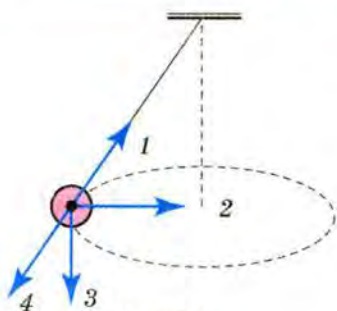
4. Дві сили $F_1 = 3$ Н і $F_2 = 4$ Н прикладені до однієї точки тіла. Кут між напрямками сил дорівнює 90° . Чому дорівнює модуль рівнодійної цих сил?

А. 7 Н. Б. 1 Н. В. 5 Н. Г. $\sqrt{7}$ Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

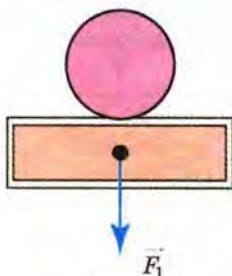
5. Куля, підвішена на нитці, рухається рівномірно по колу в горизонтальній площині (мал. 145). Який напрям має рівнодійна всіх прикладених до тіла сил?

А. $\vec{F} = 0$. Б. 1. В. 2. Г. 3. Д. 4.

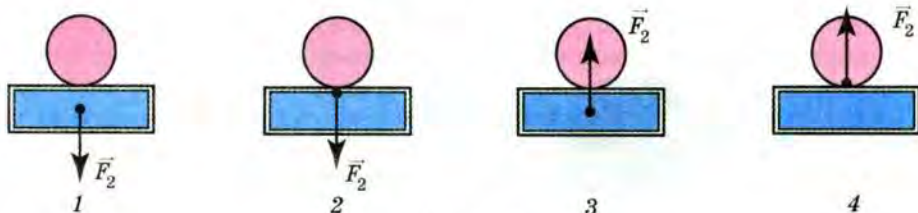
6. На мал. 146 показані напрям і точка прикладання сили \vec{F}_1 , яка діє під час удару м'яча. На якому з малюнків (мал. 147 (1—4)) правильно пока-



Мал. 145



Мал. 146

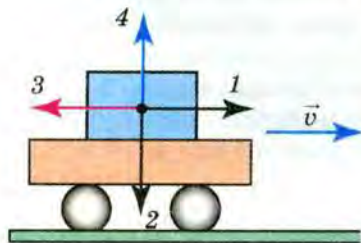


Мал. 147

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.

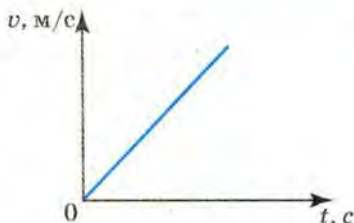
Г. Збільшиться в 4 рази.

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.

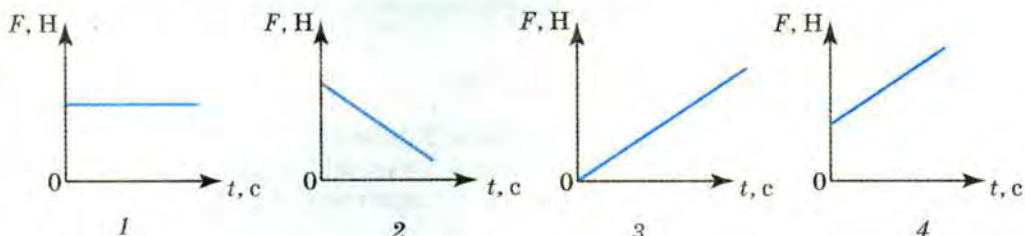
- А. Тільки під час руху вгору.
 Б. Тільки під час руху вниз.
 В. Тільки під час досягнення верхньої точки.
 Г. Під час всього польоту не дорівнює нулю.
 Д. Під час всього польоту після кидка дорівнює нулю.



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?

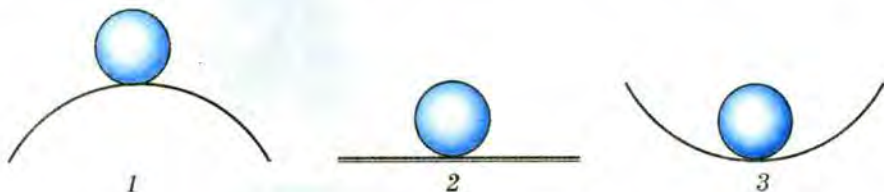
- А. 10 Н. Б. 1 Н. В. 11 Н. Г. 9 Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

16. На якій поверхні нерухомий м'яч буде знаходитися у стані нестійкої рівноваги (мал. 151)?

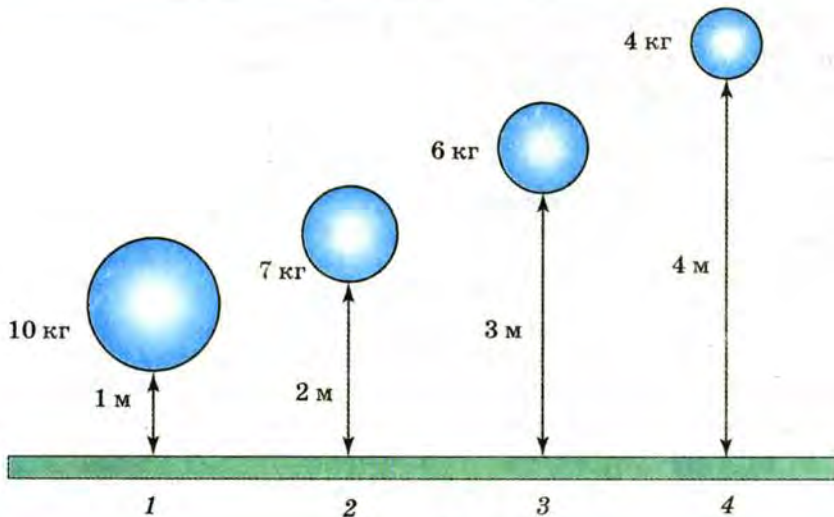
- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. В усіх трьох точках. Д. Ні в одній із трьох точок.

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 $E_{к.легк}$ і вантажного $E_{к.вант}$ автомобілів.

А. $E_{к.легк} = E_{к.вант}$.

Б. $E_{к.легк} = 2E_{к.вант}$.

В. $E_{к.вант} = 2E_{к.легк}$.

Г. $E_{к.легк} = 4E_{к.вант}$.

Д. $E_{к.вант} = 4E_{к.легк}$.

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?

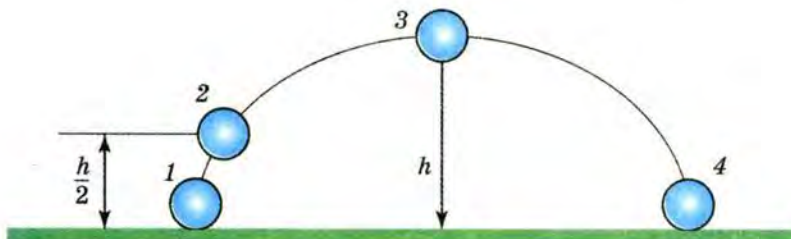
А. Зменшиться в 2 рази.

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.

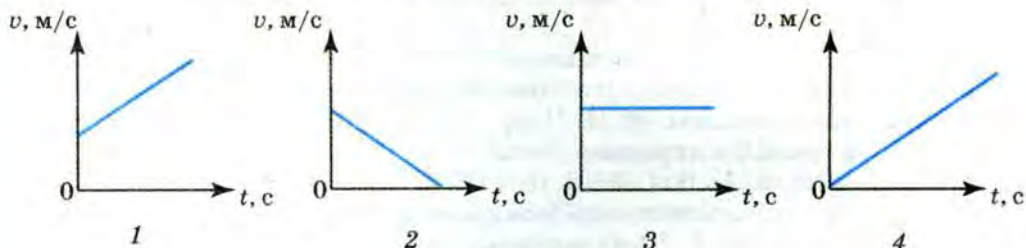
22. Два автомобілі однакової маси m рухаються зі швидкостями v і $2v$ відносно Землі в протилежних напрямках. Чому дорівнює кінетична енергія другого автомобіля в системі відліку, пов'язаної з першим автомобілем?

А. $0,5 mv^2$. Б. mv^2 . В. $2 mv^2$. Г. $4,5 mv^2$. Д. $1,5 mv^2$.

Варіант II

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 напрями швидкості \vec{v} і прискорення \vec{a} м'яча. Який з наведених на мал. 155, б напрямів 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?

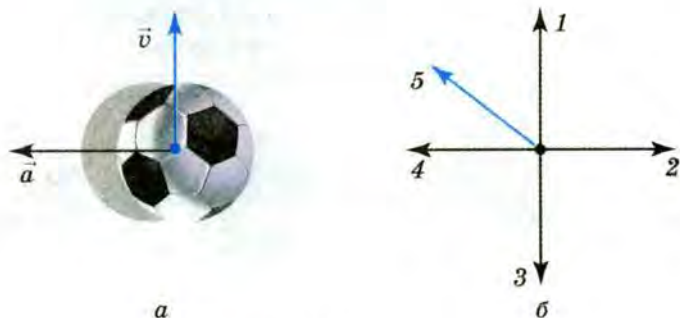
А. Рівномірно, зі швидкістю 2 м/с.

Б. Рівноприскорено, з прискоренням 2 м/с².

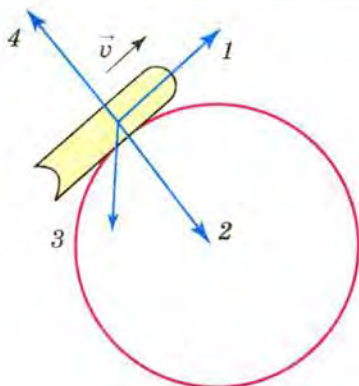
В. Рівноприскорено, з прискоренням 0,5 м/с².

Г. Рівномірно, зі швидкістю 0,5 м/с.

Д. Рівноприскорено, з прискоренням 32 м/с².



Мал. 155



Мал. 156

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 $m_1 = m_2 = 1$ 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?

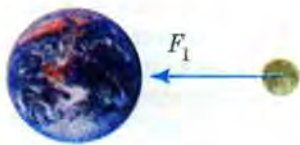
А. Збільшиться в 3 рази.

Б. Зменшиться в 3 рази.

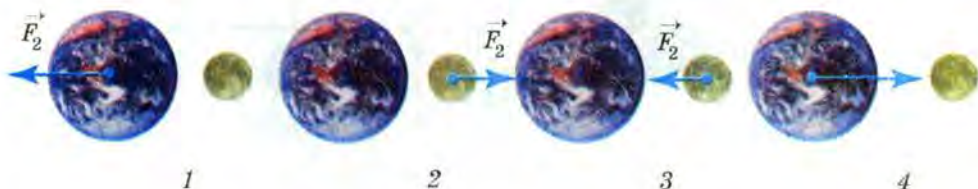
В. Збільшиться в 9 разів.

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.

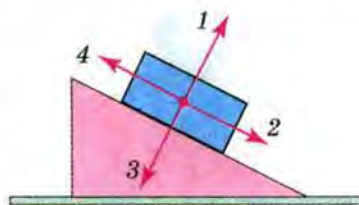
15. Ліфт опускається з прискоренням 10 м/с² вертикально вниз. У ліфті знаходиться тіло, маса якого 1 кг. Яка вага тіла? Прискорення вільного падіння прийняти за 10 м/с².

А. 0 Н. Б. 10 Н. В. 20 Н. Г. 1 Н. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

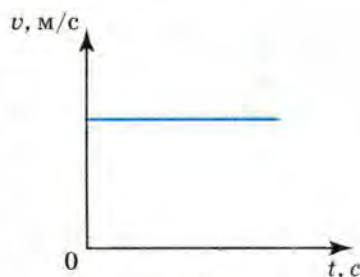
16. На якій поверхні нерухомий м'яч буде знаходитися в стані стійкої рівноваги (мал. 162)?

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. На усіх трьох. Д. Ні на одній із трьох.

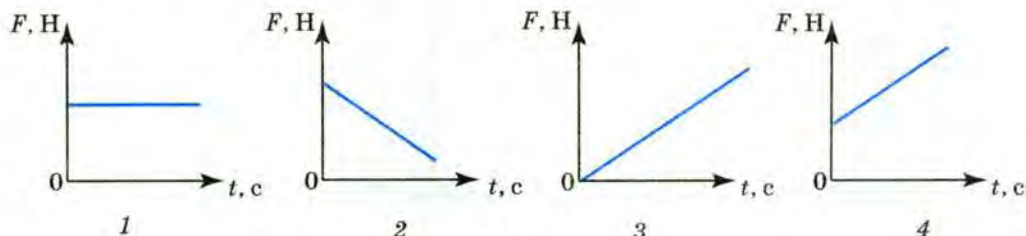
17. Під час пострілу з автомата куля масою m вилітає зі швидкістю v . Якого імпульсу набуває внаслідок пострілу автомат, якщо його маса в 500 разів більша за масу кулі?



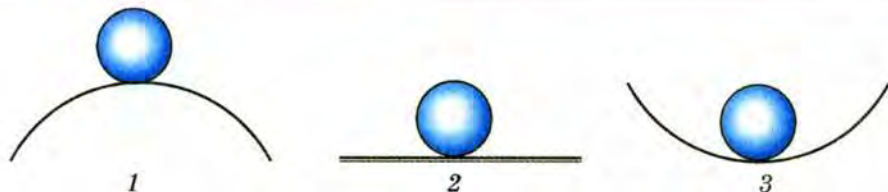
Мал. 159



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 $E_{к.легк}$ і вантажного $E_{к.вант}$ автомобілів.

А. $E_{к.легк} = E_{к.вант}$.

Б. $E_{к.легк} = 2E_{к.вант}$.

В. $E_{к.легк} = 4E_{к.вант}$.

Г. $E_{к.легк} = 8E_{к.вант}$.

Д. $E_{к.легк} = 16E_{к.вант}$.

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?

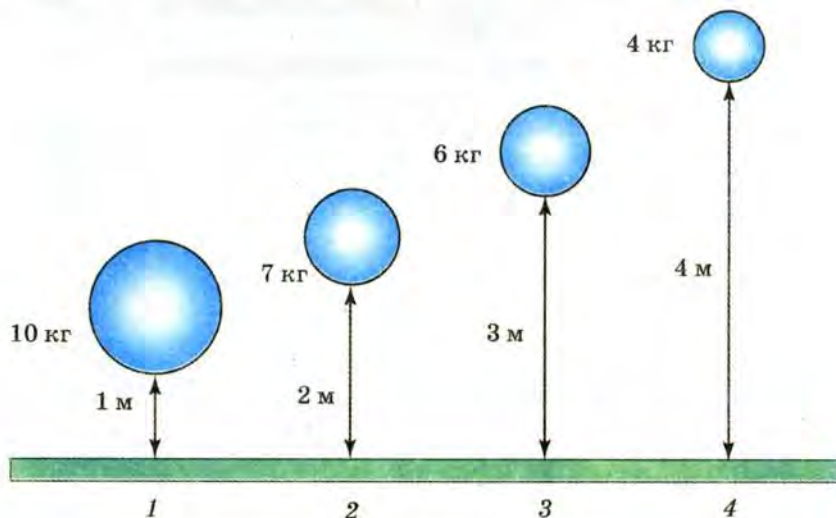
А. Не зміниться.

Б. Збільшиться в $\sqrt{3}$ разів.

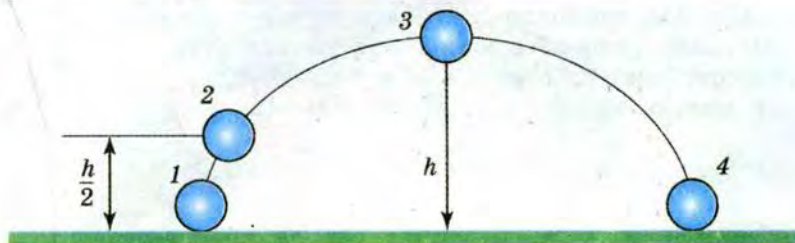
В. Збільшиться в 3 рази.

Г. Збільшиться в 9 разів.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.



Мал. 163



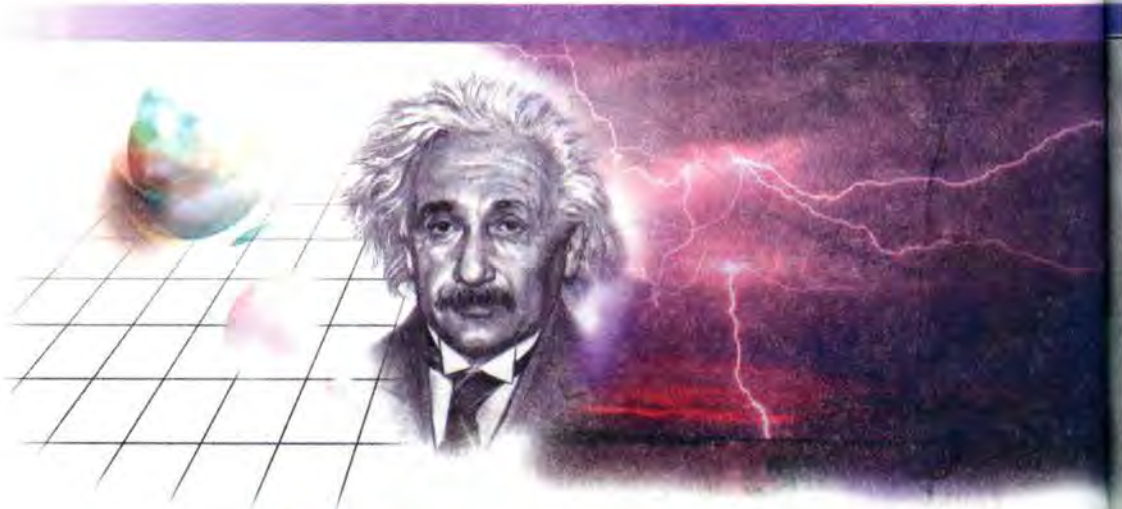
Мал. 164

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. $1,5 mv^2$.



Розділ 3 РЕЛЯТИВІСТЬСЬКА МЕХАНІКА

- Основні положення спеціальної теорії відносності. Закон взаємозв'язку маси та енергії
- Відносність часу. Перетворення Лоренца. Швидкість світла у вакуумі як гранично допустима швидкість передавання взаємодії
- Розміри тіл та інтервали часу в різних системах відліку

§ 37 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ. ЗАКОН ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МАСИ ТА ЕНЕРГІЇ

Дослід Альберта Майкельсона і Альберта Морлі, виконаний у 1887 р., показав, що рух Землі не впливає на швидкість поширення світла. Цей факт був приголомшуючим. Фізики настільки були впевнені, що рух Землі повинен змінювати швидкість поширення світла відносно нерухомої системи координат, що не могли повірити в результат дослідів. Вихід з такої незвичайної ситуації було знайдено геніальним ученим Альбертом Ейнштейном. У 1905 р. він опублікував статтю «До електродинаміки рухомих середовищ», в якій довів, що дослід Майкельсона—Морлі аналогічний дослідам, які він проводив усередині вагона, що рухався рівномірно відносно Землі. У цих дослідях Земля виконувала роль нерухомої системи відліку, а вагон — роль рухомої, об'єктом вивчення були механічні явища. У досліді Майкельсона—Морлі за нерухомих систем відліку брали Сонце, роль рухомої системи відліку відіграла Земля, а об'єктом вивчення були оптичні явища.

Рівномірний рух вагона, як ми знаємо, не впливає на перебіг механічних явищ, і тому в інерціальній системі відліку, пов'язаній з вагоном, всі механічні явища протікають так само, як і у системі відліку, пов'язаній із Землею. Отже, якщо результат дослідів Майкельсона—Морлі виявився негативним, то це означає, що рівномірний рух Землі не змінює швидкості поширення світла у системі відліку, пов'язаній із Землею. І

швидкість поширення світла у вакуумі однакова для всіх інерціальних систем відліку, незалежно від швидкості їх руху одна відносно одної. Рівномірний рух системи відліку не впливає на характер оптичних явищ аналогічно тому, як рівномірний рух вагона не змінює характеру механічного руху тіл.

Таким чином, А. Ейнштейн (1879—1955) дійшов двох важливих висновків:

1. Усі явища природи в інерціальних системах відліку за однакових початкових умов протікають однаково.

2. В усіх інерціальних системах відліку швидкість поширення світла у вакуумі однакова і дорівнює 300 000 км/с.

Ці два положення становлять основу спеціальної теорії відносності (СТВ) Ейнштейна. Вони називаються принципами, або постулатами теорії відносності. Перше положення спеціальної теорії відносності називається **принципом відносності Ейнштейна**.

Перший постулат можна сформулювати і в більш поширеній формі. Ніякі фізичні досліди, що проводяться всередині рухомої системи відліку (лабораторія, вагон), не дають змогу встановити, чи знаходиться ця система в прямолінійному і рівномірному русі, чи ні.

У класичній механіці цей постулат відомий під назвою принципу відносності Галілея. Заслуга Ейнштейна полягає у поширенні принципу відносності Галілея на електромагнітні явища. Не дивлячись на те, що обидва принципи окремо вже існували у фізиці, їх об'єднання як основи фізичної теорії було значним кроком уперед, тому що вони, взяті разом, потребують перегляду основних уявлень про простір і час.

Використовуючи ці постулати, Ейнштейн показав відносність низки понять (одночасності, розмірів тіл, інтервалів часу тощо), що вважалися до нього абсолютними і не залежали від вибору системи координат. Виявлена відносність низки основних фізичних величин мала дуже значний вплив на фізиків і на самого автора теорії відносності. Саме тому створена Ейнштейном теорія і отримала назву **теорії відносності**. Ця назва вибрана ще й тому, що перший постулат носить назву «постулат відносності», або «принцип відносності».

Проте слід зазначити, що назва теорії вибрана невдало, оскільки основний зміст теорії відносності полягає у встановленні як взаємозв'язку часу і простору, так і абсолютних властивостей матерії.

Виключно важливим наслідком постулатів теорії відносності є закон взаємозв'язку між масою і енергією тіла.

Між масою і енергією в природі існує певне кількісне співвідношення: кожній одиниці маси відповідає строго визначена кількість енергії:

$$E = mc^2. \quad (3.1)$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які експериментальні факти є основою теорії відносності?
2. Які положення (постулати, передумови) покладені в основу теорії відносності? Скільки положень необхідно для побудови теорії відносності?
3. Чи можна поставити дослід на Землі для виявлення руху Землі навколо Сонця?
4. Сформулюйте принцип відносності Ейнштейна.

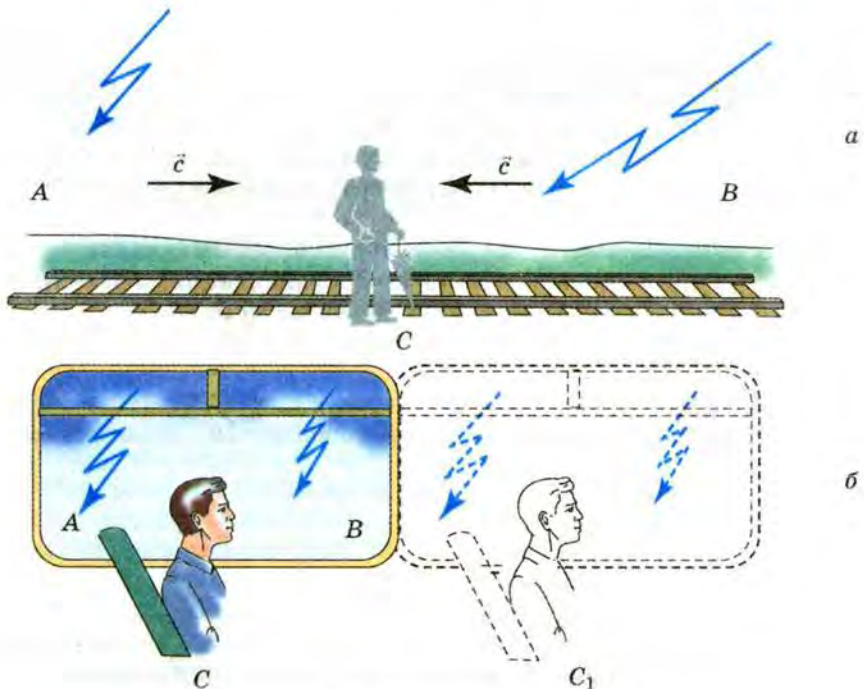
5. Чим відрізняється принцип відносності Галілея від принципу відносності Ейнштейна?
 6. Як взаємопов'язані маса тіла і його енергія з погляду сучасної фізики?

§ 38 ВІДНОСНІСТЬ ЧАСУ. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА.
 ШВИДКІСТЬ СВІТЛА У ВАКУУМІ ЯК ГРАНИЧНО
 ДОПУСТИМА ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ
 ВЗАЄМОДІЇ

Розглянемо дві інерціальні системи відліку, одну з них ми пов'яжемо із Землею, а іншу — з рівномірно рухливим відносно неї вагоном. Нехай у системі відліку, пов'язаній із Землею (мал. 165, *a*), у пунктах *A* і *B* у момент часу *t* відбувається спалах блискавки. У точці *C* на однаковій відстані від пунктів *A* і *B* знаходиться спостерігач. Вважаємо, що світло, яке поширюється від точки *A*, досягає спостерігача у момент часу t_1 , а світло, — від точки *B*, — у момент часу t_2 . Оскільки світло поширюється в усіх інерціальних системах відліку зі сталою швидкістю *c*, то очевидно: $AC = c(t_1 - t)$, $CB = c(t_2 - t)$.

Оскільки $AC = BC$, то: $c(t_1 - t) = c(t_2 - t)$, звідки $t_1 = t_2$. Отже, світло від точок *A* і *B* до спостерігача приходить одночасно.

Тепер припустимо, що вздовж залізничного полотна рівномірно рухається вагон, у якому знаходиться спостерігач, і в той момент, коли відбувається спалах блискавки, він також знаходиться у точці *C*. Проте за



Мал. 165

час, поки світло поширюватиметься від точки A до точки C , спостерігач зміститься в точку C_1 (мал. 165, б), тому $AC_1 > C_1B$. Оскільки в обох системах відліку швидкість поширення світла однакова і дорівнює c (другий постулат), то $AC_1 = c(t_1 - t)$, а $CB = c(t_2 - t)$. Отже, $c(t_1 - t) > c(t_2 - t)$, звідки $t_1 > t_2$. Світло від точки A прийде до спостерігача пізніше, ніж від точки B , і, таким чином, спостерігач у вагоні зазначить, що спалах блискавки у пунктах A і B відбувається неодноразомно.

Отже, перший спостерігач (нерухомий) вважає, що спалахи блискавки у точках A і B відбуваються одночасно, а другий спостерігач, який знаходиться у вагоні, вважає, що спалахи блискавки у цих точках відбуваються у різні моменти часу. *Хто ж з них правий?*

Теорія відносності відповідає на це запитання так: праві обидва спостерігачі. Справа у тому, що в системі відліку, пов'язаній із Землею, спалахи блискавок в обох точках відбуваються одночасно, а в системі відліку, пов'язаній із вагоном, ці ж дві події виявляються неодноразомними. Отже, **час в обох системах відліку спливає неоднаково**. У природі не існує єдиного універсального часу. Для кожної інерціальної системи відліку існує свій власний місцевий час. Чим більша швидкість, з якою переміщуються одна відносно одної дві інерціальні системи відліку, тим більше час однієї системи відліку відрізняється від часу іншої.

Згідно з другим постулатом теорії відносності швидкість поширення світла в усіх інерціальних системах відліку є сталою. Це чітко встановлений експериментальний факт, як показав дослід Майкельсона—Морлі, суперечить класичному закону додавання швидкостей. Отже, перетворення Галілея непридатні для опису явищ, які відбуваються зі швидкостями, що порівнюються зі швидкістю світла. Тому виникла необхідність знайти формули переходу від однієї інерціальної системи відліку до іншої, що узгоджуються з основними постулатами спеціальної теорії відносності.

Розглянемо дві інерціальні системи відліку: нерухому систему відліку x, y, z , пов'язану із Землею, і рухому — x', y', z' , пов'язану, наприклад, з космічним кораблем, який переміщується вздовж напрямку осі Ox зі швидкістю v відносно Землі. Тоді вздовж осей Oy і Oz рух відсутній, і тому

$$y' = y \text{ і } z' = z. \quad (3.2)$$

Оскільки час в обох системах відліку спливає неоднаково, позначимо його відповідно: t і t' . Ейнштейн показав, що координати x однієї й тієї ж точки і час у нерухомій і рухомій системах відліку пов'язані між собою такими співвідношеннями:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.3)$$

Співвідношення

$$y' = y \text{ і } z' = z, \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.4)$$

дають змогу за відомими координатами x, y, z точки A і часу t у нерухомій системі відліку визначити координати цієї ж точки і час у рухомій системі відліку. Вперше ці співвідношення отримав голландський учений Лоренц

ще до створення теорії відносності. За пропозицією Ейнштейна вони були названі **перетвореннями Лоренца**.

Лоренц виходив з того, що у природі існує єдиний універсальний час для всіх систем відліку. Ейнштейн же на підставі аналізу всіх попередніх способів вимірювання довжини і часу прийшов до висновку, що **в природі не існує єдиних універсальних для всіх систем відліку часу і довжини. Абсолютна довжина і абсолютний час — ці поняття позбавлені фізичного змісту і не мають реального змісту.**

Відмова від попередніх традиційних поглядів дала змогу Ейнштейну створити революційну за своїм змістом теорію, яка докорінно змінила уявлення про властивості простору і часу.

Перетворення Лоренца залишаються справедливими тільки доти, доки швидкість руху рухомої системи відліку v буде меншою за швидкість світла c у вакуумі. При швидкостях $v > c$ підкореневий вираз стає від'ємним і перетворення Лоренца втрачають фізичну суть.

Це означає, що **в жодній системі відліку ніяке тіло, або частинка не може рухатися зі швидкістю, більшою за швидкість поширення світла у вакуумі. Швидкість поширення світла у вакуумі є гранично можливою швидкістю передачі енергії від однієї точки простору до іншої.**

Швидкість світла у вакуумі є максимальною для всіх тіл і будь-якого виду сигналів (під сигналом розуміють будь-який процес, що переносить інформацію), тобто, якщо тіло в якій-небудь системі координат мало швидкість $v \leq c$, то в жодній системі координат воно не може мати швидкість, більшу за швидкість поширення світла. Це безпосередньо випливає із формули додавання швидкостей.

Дійсно, нехай в нерухомій системі координат K сигнал або тіло рухається зі швидкістю v і нехай система K' рухається назустріч сигналу зі швидкістю $u \leq c$, тоді в системі координат K' швидкість сигналу

$$v' = \frac{v+u}{1+\frac{uv}{c^2}} \quad (3.5)$$

Чим більша швидкість u руху системи K' , тим більшою буде швидкість руху тіла або сигналу в системі K' . Замінімо швидкість руху u , яка за умовою менша за швидкість поширення світла, на швидкість світла c . Тоді ми отримаємо нерівність

$$v' = \frac{v+c}{1+\frac{cv}{c^2}} \leq \frac{c+v}{1+\frac{cv}{c^2}} = c. \quad (3.6)$$

Зрозуміло, що швидкість руху тіла або сигналу буде меншою за швидкість поширення світла.

Навіть якщо виконувати додавання швидкостей, які дорівнюють швидкості поширення світла, ми також отримаємо швидкість, не більшу за швидкість поширення світла:

$$v' = \frac{c+c}{1+\frac{c^2}{c^2}} = c. \quad (3.7)$$

Таким чином, якщо тіло має в якійсь системі відліку швидкість $v \leq c$, то в усіх реально існуючих системах відліку воно буде мати швидкість, не більшу за швидкість поширення світла.

Взагалі, в теорії відносності можливі швидкості, більші за швидкість поширення світла у вакуумі. Однак з такими швидкостями тіла або сигнали рухатися не можуть.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Поясніть одночасність двох подій, які відбулися у різних точках (точки A і B) (мал. 165), відносно яких спостерігач знаходиться у спокої.
2. Як можна встановити, що події відбулися одночасно?
3. Що таке перетворення Лоренца? Коли вони є справедливими?
4. Чи змінюється напрям і значення швидкості поширення світла при переході від однієї системи координат до іншої?
5. Яку властивість має швидкість поширення світла у вакуумі?

§ 39 РОЗМІРИ ТІЛ ТА ІНТЕРВАЛИ ЧАСУ В РІЗНИХ СИСТЕМАХ ВІДЛІКУ

Нехай у системі відліку, що рухається відносно Землі, знаходиться стержень. Відносно цієї системи відліку стержень не рухається, але сама система відліку рухається відносно Землі зі швидкістю v , тоді довжина стержня у рухомій системі відліку $l'_0 = x'_2 - x'_1$. Розмір тіла, виміряний у системі відліку, відносно якої він не рухається, називається його власним розміром.

Виміряємо тепер довжину цього ж стержня в нерухомій системі відліку, пов'язаній, наприклад, із Землею. Згідно з перетвореннями Лоренца маємо

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{і} \quad x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.8)$$

Вимірювання координат проводитимемо в один і той же момент часу t , тоді

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - vt) - (x_1 - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.9)$$

Очевидно, що $x_2 - x_1 = l$, де l — довжина стержня у нерухомій системі відліку. Отже, $l'_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, звідки

$$l = l'_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3.10)$$

Довжина тіла у будь-якій інерціальній системі відліку, відносно якої воно переміщується, менша, ніж його власна довжина.

Якщо $v \ll c$, то $\frac{v^2}{c^2} \rightarrow 0$ і тоді $l = l'_0$. При швидкостях, що набагато менші за швидкість світла, довжина стержня в усіх інерціальних системах відліку однакова.

Аж до початку ХХ ст. у фізиці вивчалися рухи тіл, швидкості яких малі порівняно зі швидкістю світла, і тому довжина тіла в усіх системах відліку вважалася завжди однаковою. Саме з цієї причини і виникло уявлення, що розміри одного і того ж тіла в усіх системах відліку завжди однакові.

Теорія відносності внесла істотну поправку до цих уявлень. Довжина тіла у різних системах відліку різна. Чим ближча відносна швидкість руху інерціальної системи відліку до швидкості поширення світла у вакуумі, тим значніша різниця розмірів одного і того ж тіла, виміряних у рухомій і нерухомій системах відліку. Так, якщо відносна швидкість руху двох інерціальних систем відліку становить 260 000 км/с, то один і той же стержень, взятий як одиниця довжини, в одній системі відліку матиме довжину 1 м, а в іншій — 0,5 м. При таких великих швидкостях руху систем відліку подовжні розміри тіл скорочуються удвічі і внаслідок цього куб перетворюється на паралелепіпед, а куля — на сплюснутий еліпсоїд (для спостерігача, що пролітає повз нього зі швидкістю, близькою до швидкості світла). У рухомій системі відліку спостерігач ніяких змін не помітить.

Будь-яке явище, що відбувається у природі, у теорії відносності розглядається як подія. Оскільки час у різних інерціальних системах відліку спливає неоднаково, то й інтервали часу між подіями також будуть різні.

Нехай у нерухомій системі відліку в момент часу t_1 відбувається спалах блискавки, а в момент часу t_2 виникає друга подія — удар грому. Отже, інтервал часу між цими двома подіями у нерухомій системі відліку дорівнює: $\Delta t = t_2 - t_1$. Інтервал часу, виміряний у системі відліку, умовно прийнятій за нерухому, називається **власним часом**.

Визначимо тепер інтервал часу між цими ж подіями у рухомій відносно спостерігача системі відліку. Згідно з перетвореннями Лоренца маємо

$$t'_1 = \frac{t_1 - \frac{x_1 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{і} \quad t'_2 = \frac{t_2 - \frac{x_2 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.11)$$

Тоді інтервал часу між цими ж подіями у рухомій системі відліку:

$$\Delta t' = \frac{t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2} (x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.12)$$

Оскільки події відбуваються в одній і тій самій точці, то $x_1 = x_2$, і тому

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3.13)$$

а знаменник отриманого виразу менший за 1, то приходимо до висновку, що $\Delta t' > \Delta t$. Таким чином, якщо спостерігач знаходиться в нерухомій сис-

темі, то, вимірюючи довжину l і час t , він отримує їх власні значення. А спостерігач, який знаходиться у рухомій системі і рухається відносно нерухомої системи зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла, помітить, що у нерухомій системі час спливає повільніше, а довжина тіл у напрямі руху менша, ніж у тій системі відліку, в якій він знаходиться.

Явища, які виникають у системах відліку, що рухаються відносно спостерігача зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла, називаються **релятивістськими** (від лат. *relativ* — відносний).

Експериментальне підтвердження уповільнення часу було отримане при вивченні елементарних частинок речовини — мюонів. Вони виникають під дією космічного випромінювання на межі земної атмосфери. Мюони рухаються в атмосфері зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла, і досягають поверхні Землі за 10^{-3} с. Пізніше мюони були отримані і штучним шляхом. Вони виявилися дуже нестійкими частинками: мюони спонтанно розпадаються за 10^{-6} с. *Але чому ж тоді при русі через атмосферу вони «живуть» в 1000 разів довше?*

Це явище можна пояснити тільки на основі теорії відносності. Насправді ніякого протиріччя тут немає. У системі відліку, пов'язаній з мюоном, власний час його життя дорівнює 10^{-6} с. Проте в системі відліку, пов'язаній із Землею, яка рухається відносно нього зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла, час сповільнюється, і мюон існує, не розпадаючись, у 1000 разів довше. Одна і та сама подія — час життя нестійкої частинки — в різних інерціальних системах виявляється різною.



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке власна довжина тіла? Власний час?
2. Чим пояснюється скорочення поздовжніх розмірів рухомих тіл?
3. Формула скорочення довжин до цього часу експериментально не перевірена. Чим це можна пояснити?
4. Як визначається інтервал часу між подіями у рухомій відносно спостерігача системі відліку?
5. Які явища називаються релятивістськими?

Задачі та вправи

Розв'язуючи задачі зі спеціальної теорії відносності, необхідно дотримуватися таких послідовних дій.

1. Чітко встановити, яку систему відліку вважати рухомою, а яку — нерухомою, тоді буде зрозуміло, з яким саме тілом зв'язана нерухома система і в якій системі буде спостерігатися релятивістський ефект, про який йдеться в задачі.

2. Визначити, яке саме тіло знаходиться у стані спокою відносно рухомої системи відліку, і тоді параметри цього тіла вважати власними параметрами (власна довжина l_0 , власний час t_0 , маса тіла m , енергія тіла E).

3. Записати співвідношення між власними і релятивістськими параметрами тіла на основі формул.

4. Розв'язати задачу відносно шуканої величини.

Розв'язуємо разом

Розглянемо приклади розв'язання задач. Чому дорівнює тривалість життя мезона, який рухається зі швидкістю $v = 0,98c$ (c — швидкість поширення світла у вакуумі) за годинником нерухомого спостерігача, якщо власний час життя мезона $\Delta t = 2,4 \cdot 10^{-6}$ с.

Розв'язання.

Рухомий мезон пов'яжемо із власною системою відліку, яка рухається разом з ним. Час Δt життя мезона у власній системі пов'язаний з часом $\Delta t'$ його життя у системі Земля так:

$$\Delta t = \Delta t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \text{ Тому } \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Підставивши значення відомих величин, отримаємо $\Delta t' = \frac{2,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{\sqrt{1 - (0,95)^2}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

В і д п о в і д ь: $\Delta t' = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

Рівень А

257. На платформі лежить стовп, довжина якого l . Яка довжина цього стовпа з погляду спостерігача, що знаходиться у потязі, який рухається зі швидкістю v ?
258. За рахунок чого змінюється площа квадрата, що рухається у напрямі, паралельному одній із сторін?
259. Тіло, що знаходиться у спокої у даній системі відліку, має форму ідеальної кулі. Якою буде форма тіла, якщо воно рухатиметься у цій системі відліку?
260. Скільки років пройде на Землі, якщо в ракеті, що рухається зі швидкістю $0,99c$ відносно Землі, пройде 10 років?
261. На скільки часу станційний годинник відстане за 1 годину від годинника мандрівників у потязі, що рухається зі швидкістю $v = 0,5c$, якщо вважати, що станція рухається повз потяг. Який годинник покаже правильний час?
262. Довжина стержня відносно земного спостерігача 1 м. Яка довжина стержня для того ж спостерігача, якщо стержень рухається зі швидкістю $0,6c$, напрямленою вздовж лінійки?

Рівень В

263. Два електрони рухаються назустріч один одному зі швидкостями $0,9c$ відносно лабораторії. Визначте швидкість руху електрона одного відносно другого.

264. Потяг рухається зі швидкістю 100 км/год. Вздовж потяга йде людина зі швидкістю 5 км/год відносно потяга у напрямі його руху. Визначте різницю швидкостей людини відносно полотна дороги, обчислених за формулою додавання швидкостей і класичної фізики, і теорії відносності.
265. Яким повинно бути значення швидкості, щоб розміри тіла у напрямі руху скоротилися вдвічі?
266. Чи зміниться з погляду спостерігача на Землі пульс космонавта, що летить зі швидкістю $v = 0,98 c$? Яка буде частота пульсу за спостереженнями із Землі, якщо до відльоту вона дорівнювала 60 ударів за хвилину? Чи вплине це на стан космонавта? Чи не можна використувати сповільнений рух пульсу для встановлення інерційного руху системи?
267. Ракета рухається відносно нерухомого спостерігача на Землі зі швидкістю $v = 0,99 c$, лінійні розміри тіла у ній 0,14 м. Визначте розміри цього тіла вздовж лінії руху відносно ракети.
268. Два електрони рухаються назустріч один одному зі швидкостями $v = 0,9 c$. Визначте кінетичну енергію електрона одного відносно одного і кінетичну енергію електронів у лабораторній системі відліку.
269. Яка енергія міститься в 1 г вугілля? Порівняйте її з питомою теплоотою згорання вугілля.



Історична довідка

Парадокс близнюків. Теорія Ейнштейна після своєї появи викликала багато дебатів серед учених. Це зрозуміло, тому що теорія відносності вимагала від фізиків зміни загальних уявлень. А тому противники цієї теорії здійснювали спроби її заперечити за допомогою парадоксів. Один із них отримав назву **парадокса близнюків**.

Уявімо собі двох братів-близнюків. Посадимо одного із них в космічний корабель і змусимо цей корабель рухатися в космосі з великою швидкістю. Потім повернемо корабель на Землю.

Так, якщо ми вважали Землю нерухомою, а корабель рухомим, то час в кораблі спливатиме повільніше порівняно із часом на Землі. Припустимо, що корабель повернувся на Землю після того, як на Землі пройшло 50 років. І рухався він з такою швидкістю, що за цей час на кораблі пройшов усього 1 рік.

Таким чином, брат, що перебував на кораблі, постарішав після повернення на 1 рік. Тоді як брат, що залишився на Землі, постарішав на 50 років. І тепер цих братів важко вважати близнюками.

Проте противники теорії Ейнштейна говорили, що можна міркувати інакше. За теорією відносності можна, навпаки, вважати, що космічний корабель нерухомий, а Земля з великою швидкістю спочатку віддаляється, а потім наближається до нього. Тоді, міркуючи, як і у першому випадку, ми повинні дійти висновку, що брат, який знаходився на Землі, постарішав на 1 рік, а брат у космічному кораблі постарішав на 50 років.

Отже, за першим міркуванням ми доходимо одного висновку, а за другим — прямо протилежного. І нібито два міркування правильні з точки зору теорії ймовірності. Звідси випливає висновок: теорія хибна!

Розв'язання поставленої задачі полягає у наступному. Справа у тому, що системи відліку пов'язані одна із Землею, а інша з космічним кораблем, рівноправні не

увесь час. Якщо систему відліку, пов'язану із Землею, можна розглядати у даному випадку як інерціальну, то систему, пов'язану з кораблем, такою вважати не можна.

Брат, який знаходиться у космічному кораблі, у той час, коли його швидкість змінює напрям, рухається прискорено, тому що на нього діють сили інерції. Брат, який знаходиться на Землі, таких сил не зазнає. Таким чином, брати не завжди будуть знаходитися у рівноправних умовах, і застосовувати до них теорію відносності у такому вигляді, як викладено вище, не можна. Тому тут немає ніякого парадокса.

Задачу про те, яким повернеться брат із космосу, старішим чи молодшим, можна розв'язувати, знаючи, як спливатиме час у системах відліку, що рухаються прискорено.

Це питання теорія відносності, розроблена Ейнштейном у 1905 р., не вирішувала. Відповідь на нього була отримана пізніше, коли Ейнштейн розробив загальну теорію відносності. Теорія ж відносності, про яку ми говорили вище, стосується лише випадку інерціальних систем відліку. Тому вона, на відміну від загальної теорії відносності, й отримала назву **спеціальної теорії відносності**.

Таким чином, заперечення проти теорії відносності, засноване на парадоксі близнюків, виявилось неправильним. Щодо питання про вік близнюків, то із загальної теорії відносності випливає, що, справді, брат, який здійснював подорож на космічному кораблі, повернеться на Землю молодшим, ніж його брат, який залишався на Землі.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Які рухи описує спеціальна теорія відносності: рівномірні, рівноприскорені, нерівномірні?
2. Чим розрізняється поняття часу в теорії відносності та класичній механіці?
3. Чи можна використовувати для виявлення уповільнення ходу часу звичайний годинник?
4. Чим розрізняється поняття довжини в теорії відносності та класичній механіці?
5. Чи досяжна швидкість поширення світла для тіла, що має певну масу?
6. Які сили потрібні, щоб довести швидкість руху тіла до швидкості поширення світла?
7. Чи існує єдина універсальна формула енергії, справедлива для всіх її видів? Якщо існує, то що це за формула? Запишіть її.

Що я знаю і вмію робити

Я знаю, що таке парадокс близнюків

1. Один із двох братів-близнюків *A* залишається на Землі, а другий *B* відправляється у мандрівку на міжзоряному кораблі зі швидкістю $v = 0,99999c$, де $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с. Через 5 років за своїм годинником брат *B* повертається назад. На скільки років постарішав на Землі його брат *A* за цей час?

Я знаю, що таке одночасність подій

2. У різних точках системи відліку відбуваються одночасно дві події (I і II). Сторонній спостерігач O стверджує, що подія I відбувається раніше, ніж подія II. Чи може який-небудь інший сторонній спостерігач стверджувати протилежне?

3. У теорії відносності дуже часто використовується поняття *спостерігач*. Що це означає? Чи залежить перебіг подій від того, що дійсно існує якийсь спостерігач або його немає?

Я вмю визначати зміну довжини тіла і часу між подіями, енергію тіла

4. Стержень, довжина якого 2 м, рухається зі швидкістю 0,7с. Як змінюється його довжина?

5. На скільки часу годинник пасажира потяга відстане за 1 годину, 1 рік, 100 років від станційного годинника, якщо потяг рухається зі швидкістю 120 км/год?

6. Яку енергію потрібно витратити, щоб швидкість руху електрона дорівнювала швидкості поширення світла?

Я знаю межі застосування законів

7. Чи можна користуватися законом Ньютона, записаним у вигляді $F = ma$, при швидкостях руху тіл, що порівнюються зі швидкістю поширення світла?

8. Чи можна використовувати закон Ньютона, записаний у вигляді $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$, при швидкостях руху тіл, що порівнюються зі швидкістю поширення світла?

9. Чи можна використовувати формулу для кінетичної енергії $E_k = \frac{mv^2}{2}$ при великих швидкостях руху?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Яка відносна швидкість двох космічних кораблів, що рухаються в протилежних напрямках, якщо їх швидкості ($v_1 = v_2$) 0,6 с відносно Землі?

А. $2,6452275 \cdot 10^8$ м/с.

Б. $2,9813614 \cdot 10^8$ м/с.

В. 28780075 м/с.

Г. 299 792 458 м/с.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

2. Яка відносна швидкість двох космічних кораблів, які рухаються в протилежних напрямках, якщо їх швидкості ($v_1 = v_2$) 0,9 с відносно Землі?

А. $2,6452275 \cdot 10^8$ м/с.

Б. $2,9813614 \cdot 10^8$ м/с.

В. 28780075 м/с.

Г. 299 792 458 м/с.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

3. Довжина космічного корабля на космодромі 50 м. Визначте довжину корабля (в системі відліку «СВ»—«Космодром»), який рухається з другою космічною швидкістю 11,2 км/с.

А. 24,892193 м.

Б. 50 м.

В. 49,999722 м.

Г. 49,999997 м.

Д. 47,136371 м.

4. Довжина космічного корабля на космодромі 50 м. Визначте довжину корабля (в системі відліку «СВ»—«Космодром»), який рухається зі швидкістю 100 км/с.

А. 24,892193 м.

Б. 50 м.

В. 49,999722 м.

Г. 49,999997 м.

Д. 47,136371 м.

5. За яким з математичних виразів можна обчислити енергію системи?

А. $m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}$.

Б. $m c^2$.

В. $\frac{m_0 v^2}{2c^2}$.

Г. $\frac{m_0}{1 - \frac{v^2}{2c^2}}$.

Д. $\frac{m_0}{1 - \frac{v^2}{2c^2}}$.

Частина 2

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА





Розділ 4 **ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ, РІДИН, ТВЕРДИХ ТІЛ**

- Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. Розміри атомів і молекул
- Рух атомів і молекул
- Взаємодія атомів і молекул
- Маса атомів і молекул. Кількість речовини
- Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів
- Абсолютна температура. Рівняння стану ідеального газу
- Газові закони для ізопроесів
- Пароутворення і конденсація. Насичена і ненасичена пара
- Залежність тиску насиченої пари від температури. Кипіння
- Вологість повітря. Методи вимірювання вологості повітря
- Властивості рідин. Поверхневий натяг рідини
- Змочування. Капілярні явища
- Будова і властивості твердих тіл. Кристалічні й аморфні тіла. Види деформацій. Закон Гука.
- Механічні властивості твердих тіл
- Рідкі кристали та їх властивості
- Полімери: їх властивості та застосування

Теплові явища відіграють значну роль у житті людей, тварин і рослин. У різні пори року зі зміною температури повітря на 20—30 °С змінюється навколишній світ. Зміна температури впливає на всі властивості тіл. Так, від нагрівання або охолодження змінюються розміри твердих тіл і об'єм рідин. Значно змінюються також їхні механічні властивості, наприклад пружність. Якщо при кімнатній температурі вдарити молотком по гумовій трубці, то вона залишиться цілою. Але після її охолодження до температури, нижчої за -100 °С, гума стає крихкою, як скло. Легким ударом можна розбити гумову трубку на дрібні шматочки. Тільки після нагрівання гума знову набуває своїх пружних властивостей.

Усі теплові явища, а також багато інших, підлягають певним законам. Ці закони так само точні й надійні, як і закони механіки, але відрізняються від них змістом і формою. Відкриття законів, яким підпорядковуються теплові явища, дало змогу максимально використати ці явища на практиці, у техніці. Сучасні теплові двигуни, установки для зрідження газів, холодильні та інші апарати конструюються на основі цих законів.

Теорія, яка пояснює теплові явища в макроскопічних тілах і внутрішні властивості цих тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично, називається **молекулярно-кінетичною теорією**.

У цій теорії ставиться завдання пов'язати закономірності поведінки окремих атомів і молекул з величинами, які характеризують властивості макроскопічних тіл.

§ 40 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ. РОЗМІРИ АТОМІВ І МОЛЕКУЛ

В основі молекулярної фізики лежить декілька положень, які стосуються структури речовини і закономірностей руху частинок, що входять до складу речовини. До цих положень відносять такі.

1. Речовина складається з частинок (атомів і молекул). Маса будь-якого тіла дорівнює сумі мас частинок, з яких складається тіло. Маса тіл може змінюватися лише на ціле число, кратне масі частинки. Говорять, що маса тіла може змінюватися не безперервно, а лише порціями — дискретно.

2. Молекули (атоми) всіх тіл знаходяться в безперервному тепловому русі. Невпорядкованість руху частинок — найважливіша особливість теплового руху.

3. Молекули (атоми) взаємодіють між собою — залежно від відстані між частинками вони притягуються або відштовхуються.

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини сформульовані на основі узагальнення експериментальних спостережень. Розглянемо деякі з них.

Розміри атомів і молекул. Атоми і молекули надзвичайно малі, їх неможливо розрізнити навіть за допомогою найсильніших оптичних мікроскопів. Уперше вдалося побачити окремі молекули і групи атомів за допомогою електронного мікроскопа. На фотографії (мал. 166) добре видно дискретну структуру речовини: чітко розрізняється безліч окремих частинок, розділених проміжками. Знаючи, з яким збільшенням отримана фотографія, можна визначити лінійні розміри атомів і молекул.

Розглянемо один із найпростіших способів, що дає змогу оцінити розміри молекул. Розчинимо $0,5 \text{ см}^3$ стеаринової кислоти в 1 л бензолу і за допомогою піпетки помістимо одну краплину на поверхню дистильованої води. Краплина буде розтікатися, а бензол випаровуватися, і на поверхні води утвориться надзвичайно тонкий шар стеаринової кислоти, товщина якого дорівнюватиме діаметру однієї молекули. Визначивши товщину



Мал. 166

шару, можна приблизно оцінити і розміри молекул стеаринової кислоти: її діаметр, як показали розрахунки, дорівнює 2 нм ($2 \cdot 10^{-9}$ м).

У світі атомів і молекул це справжні гіганти. Молекули переважної більшості речовин мають значно менші розміри. Так, діаметр молекул Оксигену приблизно дорівнює 0,3 нм, молекул води — 0,26 нм. Найменша молекула в природі — молекула Гідрогену, її діаметр становить 0,12 нм. Найбільшими є молекули органічних сполук і полімерів, які складаються з декількох тисяч атомів. Довжина однієї з таких гігантських молекул — молекули альбуміну становить 43 нм.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Перелічіть положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.
2. Які розміри мають атоми і молекули?
3. Які існують методи вимірювання розмірів атомів і молекул?

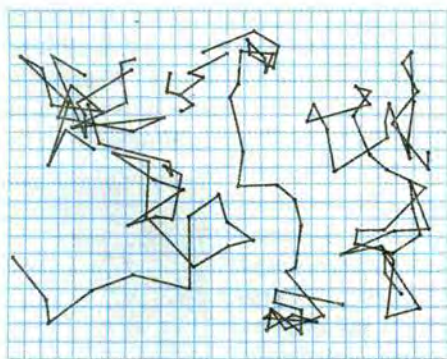
§ 41 РУХ АТОМІВ І МОЛЕКУЛ

Броунівський рух. Безпосередньо спостерігати рух окремих атомів або молекул неможливо, але існує багато явищ, які переконливо свідчать про рух молекул.

Вперше таке явище у 1827 р. спостерігав англійський ботанік **Р. Броун** (1773—1858). Розглядаючи в мікроскоп спори рослин, він помітив, що вони, плаваючи у воді, безперервно рухаються по ламаних зигзагоподібних траєкторіях. Такий же рух частинок можна спостерігати, якщо у воді розмішати трохи фарби або за наявності в повітрі твердих частинок диму. Маса і розміри цих частинок у тисячі разів більші за розміри молекул. Вони отримали назву **броунівських частинок**. Спостереження показують, що броунівські частинки здійснюють безперервний хаотичний (безладний) рух, що ніколи не припиняється. Він отримав назву **броунівського руху**.

Броунівський рух — це тепловий рух завислих у рідині або газі частинок.

Найбільш ретельне експериментальне дослідження броунівського руху було виконане французькими ученими **Жаном** і **Френсісом Перренами**. Вони фіксували точками положення однієї і тієї самої броунівської частин-



а



б

ки через кожні 30 с. Отримані точки з'єднали прямими і отримали картину, подібну тій, що зображена на мал. 167, а.

При уважному спостереженні руху броунівських частинок створюється враження, що вони рухаються під дією ударів якихось невидимих оком частинок речовини. Це молекули самої рідини або газу, які безперервно бомбардують броунівську частинку з усіх сторін одночасно (мал. 167, б). Якщо число ударів з одного боку випадково стає більшим, ніж з іншого, то броунівська частинка починає рухатися; якщо за цим відбувається поштовх з іншого боку, то напрям руху частинки змінюється. Так пояснюється хаотичність руху броунівських частинок. Хаотичність броунівського руху доводить безладність руху молекул рідини і газу.

Молекулярно-кінетичну теорію броунівського руху у 1905 р. створив А. Ейнштейн. Проте остаточно молекулярно-кінетична теорія затвердилася після того, як Ж. Перрен побудував теорію броунівського руху і підтвердив її експериментально.

Явище дифузії. Крім броунівського руху, відомі й інші факти, що свідчать про рух атомів і молекул. За допомогою піпетки помістимо у високий скляний циліндр краплину бром. Бром випаровується і його пара, хоча вона і важча за повітря, поступово заповнює всю посудину.

Якщо до дистильованої води обережно за допомогою піпетки додати трохи розчину мідного купоросу, то протягом кількох днів молекули мідного купоросу піднімуться вгору і поволі забарвлять воду в блакитний колір.

Дві металеві пластинки, щільно притиснуті одна до одної протягом декількох років, зростаються. Якщо ж ці пластинки помістити у піч при температурі 300—400 °С, то такий же результат отримаємо через декілька діб.

Процес взаємного проникнення частинок однієї речовини у міжмолекулярні проміжки іншої без дії зовнішніх сил називається **дифузією**.

Вона можлива тільки внаслідок того, що частинки речовини знаходяться в стані безперервного руху. Таким чином, явища броунівського руху і дифузії переконують нас у тому, що молекули, атоми та йони знаходяться в стані безперервного руху.

Явище дифузії відіграє важливу роль у живій природі. Воно лежить в основі обміну речовин і енергії у живих організмах. Завдяки дифузії поживні речовини переходять з навколишнього середовища в живу клітину, а продукти розпаду виводяться з неї в навколишнє середовище. Без цих процесів життя було б неможливе.



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Який рух називається броунівським?
2. Хто із учених пояснив цей рух?
3. У чому полягає явище дифузії?
4. Розкажіть, яку роль відіграє явище дифузії у житті живих організмів.

§ 42 ВЗАЄМОДІЯ АТОМІВ І МОЛЕКУЛ

Вам уже відомо, що до складу атомів і молекул входять електрично заряджені частинки речовини — протони й електрони. Тому між атомами і

молекулами всіх речовин одночасно діють і сили притягання (між різномірно зарядженими частинками), і сили відштовхування (між однойменно зарядженими частинками).

Сили, що діють між атомами і молекулами речовини, називаються молекулярними силами.

У реальному існуванні молекулярних сил нас переконують багато дослідних фактів. Наприклад, той факт, що тверді тіла зберігають свої розміри і форму, можна пояснити тільки тим, що між атомами і молекулами твердих тіл існують сили притягання. Якщо щільно притиснути одна до одної кілька металевих, добре відполірованих плиток (плиток Йогансона), то завдяки силам притягання між молекулами плиток так міцно утримуються одна біля одної, що з них можна скласти цілий ланцюжок (мал. 168). Такі плитки використовуються для точного вимірювання довжини і контролю вимірвальних приладів.

Сили молекулярного притягання виникають не тільки між однорідними, а й між різнорідними речовинами. Підвісимо на нитках до динамометра скляну або добре відполіровану металеву пластинку так, щоб її нижня поверхня стикалася з водою. Тепер спробуємо відірвати її від води. Пружина динамометра помітно розтягується: між молекулами води і пластинки виникають сили притягання. Сили притягання між молекулами виникають завжди, коли відстань між ними дорівнює радіусу сфери молекулярної дії або стає меншою за нього. Значення цих сил визначається природою взаємодіючих молекул.

Існування сил відштовхування між молекулами речовини можна також виявити за допомогою багатьох дослідів. Наприклад, якщо натиснути на поршень велосипедного насоса, закривши вихідний отвір, то довести поршень до кінця ми не зможемо, оскільки між молекулами газу діють сили відштовхування. Закриємо отвір медичного шприца, заповненого рідиною. Натискаючи на його поршень, ми виявимо, що між молекулами рідини існують настільки великі сили відштовхування, що сили людини недостатньо, щоб скільки-небудь помітно зменшити об'єм рідини. Згинаючи металеву лінійку, змінюємо її форму і розміри. Після припинення дії зовнішніх сил лінійка відновить свою форму і розміри. Це можливо тільки в тому випадку, коли між частинками, з яких вона складається, діють одночасно сили відштовхування і притягання.

Слід зауважити, що молекулярні сили діють тільки на дуже малих відстанях: молекули взаємодіють тільки зі своїми найближчими сусідами. Цей висновок підтверджується спостереженнями. Так, розбиті частини скляної трубки не вдається з'єднати знов. Чому? Очевидно тому, що через нерівності поверхні зламу молекули опиняються на таких відстанях, де молекулярні сили вже не діють. Якщо ж нагрівати місце зламу, то скло стає м'яким, тепер його окремі частини легко зблизити, між молекулами виникають достатньо великі сили і обидві частини скляної трубки легко з'єднати.

Отже, молекулярні сили дуже швидко зменшуються з відстанню



Мал. 168

і практично дорівнюють нулю, коли відстань між центрами молекул перевищує 1 нм (10^{-9} м).

Область простору, в якій діють молекулярні сили, називається **сферою молекулярної дії**, радіус цієї сфери порядку 10^{-9} м.

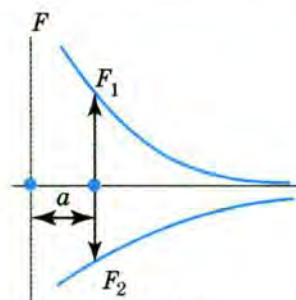
Сили притягання і відштовхування, що діють між молекулами, залежать від відстані між ними. Характер цієї залежності складний, його наочно ілюструє графік (мал. 169). На осі абсцис відкладено відстані між центрами частинок r , а на осі ординат — сили взаємодії між ними F .

Сили відштовхування F_1 будемо вважати додатними, а сили притягання F_2 — від'ємними. Коли відстань між частинками збільшується, сили притягання F_2 і сили відштовхування F_1 зменшуються, але неоднаково: сили відштовхування зменшуються швидше за сили притягання. Навпаки, при зменшенні відстані між частинками сили притягання і сили відштовхування збільшуються одночасно, але знову-таки неоднаково: сили відштовхування збільшуються швидше за сили притягання. На певній відстані a між центрами взаємодіючих частинок сили притягання дорівнюють силам відштовхування. У цьому положенні частинки знаходяться в стані рівноваги одна відносно одної.

Відстань між частинками, що знаходяться в стані рівноваги, називається **рівноважною відстанню**.

Якщо відстань між центрами частинок стає меншою за рівноважну, то сили відштовхування, що збільшуються швидше за сили притягання, починають переважати, і частинки відштовхуються одна від одної.

При збільшенні відстані між центрами частинок сили притягання стають більшими за сили відштовхування, і частинки притягуються одна до одної.



Мал. 169

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які сили називаються молекулярними?
2. Що називається сферою молекулярної дії?
3. Що таке рівноважна відстань?
4. Як залежать сили відштовхування і сили притягання від відстані між молекулами?

§ 43 МАСА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ

Ви вже знаєте, що атоми і молекули складаються з певної кількості елементарних частинок — електронів, протонів і нейтронів, які мають масу. Отже, атоми і молекули всіх речовин також мають певну масу. Маса атома і молекули надзвичайно мала. На сьогодні її вимірюють з дуже великою точністю за допомогою спеціальних приладів — мас-спектрометрів.

У табл. 1 наведено значення мас атомів деяких хімічних елементів, поданих у кілограмах. Слід зазначити, що в цьому випадку маса навіть найбільш важких атомів — Плюмбуму й Урану — виражається дуже малими числами, незручними для розрахунків.

Маси атомів деяких хімічних елементів

Таблиця 1

Елемент	Маса атома	
	$\times 10^{-27}$ кг	а.о.м
Гідроген	1,67	1,008
Гелій	6,64	4,003
Карбон	19,9	12,00
Нітроген	23,2	14,01
Оксиген	26,6	15,99
Хлор	58,9	35,5
Ферум	92,8	55,9
Плюмбум	344	207,2
Уран	394	238,03

Щоб усунути цю незручність, для вимірювання маси атомів і молекул була прийнята спеціальна одиниця — **атомна одиниця маси** (скорочено **а.о.м**). За атомну одиницю маси береться $1/12$ частка маси атома Карбону. Користуючись даними, наведеними в табл. 1, легко розрахувати, що $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, і визначити масу атомів хімічних елементів в а.о.м.

Маса атома, виміряна в атомних одиницях маси, називається **атомною масою**. Маса молекули, виміряна в атомних одиницях маси, називається **молекулярною масою**.

Молекулярна маса є сумою атомних мас атомів, які утворюють дану молекулу. Визначимо, наприклад, молекулярну масу оксиду Карбону, так званого вуглекислого газу. Хімічна формула цієї речовини — CO_2 , отже, її молекулярна маса (з точністю до цілих): $m = 12 \text{ а.о.м} + 2 \cdot 16 \text{ а.о.м} = 44 \text{ а.о.м}$. Аналогічно можна визначити молекулярну масу будь-якої речовини.

Визначимо молекулярну або атомну масу деяких речовин і результати обчислень занесемо в табл. 2. Візьмемо стільки грамів кожної речовини, скільки атомних одиниць маси містить у собі одна його молекула або атом, тобто 12 г вуглецю, 32 г кисню, 28 г азоту і т.д.

Молекулярні (атомні) маси деяких речовин

Таблиця 2

Речовина	Хімічна формула	Молекулярна маса, а.о.м	Молярна маса $\times 10^{-3}$ кг/моль
Карбон	C	12	12
Оксиген	O ₂	32	32
Азот	N ₂	28	28
Вода	H ₂ O	18	18
Аміак	NH ₃	17	17

Кількість речовини, маса якої в грамах дорівнює її молекулярній або атомній масі, називається **молем даної речовини**.

Позначатимемо масу моля даної речовини (молярну масу) літерою μ . Одиницею молярної маси в СІ є **кілограм на моль (кг/моль)**.

Таким чином, один моль Карбону дорівнює $12 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, Оксигену $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, води $18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Знаючи масу одного моля і масу однієї молекули (атома), визначаємо число молекул, що містяться в одному молі різних речовин. Відповідні розрахунки (виконайте їх самостійно) свідчать, що для всіх речовин результати виходять однаковими, тобто **в одному молі будь-якої речовини**

міститься однакове число атомів або молекул: $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль (моль⁻¹). Це закон Авогадро — один із фундаментальних законів молекулярної фізики. Число атомів або молекул, що містяться в одному молі речовини, носить назву **сталі Авогадро**.

Знаючи сталу Авогадро N_A і масу одного моля μ , можна визначити масу атома або молекули досліджуваної речовини:

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A}. \quad (4.1)$$

Знаючи сталу Авогадро, можна визначити і число атомів або молекул N , які утворюють тіло будь-якої маси m . Якщо маса одного атома або молекули дорівнює m_0 , то, очевидно, маса всього тіла $m = m_0 N$, а маса одного моля $\mu = m_0 N_A$. Розділимо ці два рівняння почленно: $\frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}$, звідки $N = \frac{m N_A}{\mu}$.

Усі тіла, що нас оточують, складаються з різних речовин. І цеглина, і пігулка ацетилсаліцилової кислоти, і склянка води містять у собі певну кількість речовини. Про кількість речовини, яка знаходиться всередині тіла, можна судити за кількістю його абсолютно однакових структурних елементів, з яких вона складається. Такими структурними елементами можуть бути молекули, йони, атоми та інші частинки, з яких побудована речовина. Проте число частинок, які утворюють макроскопічні тіла, настільки велике, що практично порахувати їх неможливо. Тому для визначення кількості речовини, що утворює дане тіло, домовилися порівнювати число частинок, з яких воно складається, з числом частинок, що містяться в одному молі Карбону.

Величина, яка визначається відношенням числа структурних елементів N , з яких складається дане тіло, до атомів N_A , що містяться в одному молі Карбону, називається **кількістю речовини** (позначається літерою ν (ню)):

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (4.2)$$

За одиницю кількості речовини в СІ береться така її кількість, яка міститься в одному молі Карбону.

Одиниці кількості речовини присвоєна назва **моль**. Якщо кількість речовини дорівнює 1,5 моля, то це означає, що дане тіло містить у собі у 1,5 рази більше частинок (молекул, атомів, йонів), а отже, і речовини, ніж її міститься у 12 г (в одному молі) Карбону.

Якщо маси частинок, з яких утворене тіло, абсолютно однакові, то про кількість речовини у даному тілі можна судити за його масою. Дійсно, враховуючи співвідношення $\nu = \frac{N}{N_A}$, кількість речовини

$$\nu = \frac{m}{\mu}. \quad (4.3)$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке атомна одиниця маси?
2. Що таке молекулярна маса? Молярна маса?
3. Чому дорівнює число Авогадро?
4. Як визначається маса одного атома або молекули?
5. Що таке кількість речовини? Яка її одиниця в СІ?

§ 44 ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ГАЗІВ

Речовини у газоподібному стані не мають власної форми і сталого об'єму: гази завжди повністю займають об'єм тієї посудини, в якій вони знаходяться. За нормальних умов середні відстані між молекулами газу в десятки разів більші за їх власні розміри, тому молекули газу практично не взаємодіють між собою.

При вивченні властивостей газів нехтують дійсною формою і розмірами їх молекул і умовно вважають, що молекули газів мають форму кульок певної маси. Вони рівномірно розподілені в усьому об'ємі, що займає газ, і взаємодіють між собою тільки в моменти зіткнення одна з одною. Такий газ називають ідеальним. Ідеальний газ — це спрощена модель реально існуючих газів. Така ідеалізація істотно полегшує кількісний опис процесів, що відбуваються у реальних газах.

Ідеальний газ — це газ, взаємодія між молекулами якого така мала, що нею можна знехтувати.

Отже, у фізичній моделі беруться до уваги лише ті властивості реальної системи, які абсолютно необхідні для пояснення досліджуваних закономірностей поведінки цієї системи.

На відміну від ідеального газу молекули реальних газів мають скінченні, хоча і дуже малі, розміри. Між молекулами реальних газів постійно діють молекулярні сили. Не дивлячись на це, вже за нормальних умов багато реальних газів за своїми властивостями близькі до ідеального. Вивчивши властивості ідеального газу, можна з досить великою точністю застосовувати встановлені для нього закономірності і до реальних газів.

Хаотично рухаючись у різних напрямках, молекули ідеального газу неминуче стикаються одна з одною і зі стінками посудини, в якій знаходиться газ. Молекула масою m_0 , рухаючись зі швидкістю v , має певний імпульс. Під час удару об стінку посудини молекула передає їй частину свого імпульсу, тобто діє на неї з певною силою. Значення цієї сили для однієї молекули дуже мале, але за кожен одиницю часу об стінку посудини вдаряється величезна кількість молекул, і з цих дій складається тиск, з яким газ діє на стінки посудини навіть при відсутності будь-яких зовнішніх дій на нього. Визначимо значення цього тиску.

Нехай у посудині, що має форму куба з ребром a , у кожній одиниці її об'єму знаходиться N_0 молекул ідеального газу. Якщо маса однієї молекули дорівнює m_0 і вона рухається зі швидкістю v , то її імпульс $p_1 = m_0 v$. Удар молекули об стінку куба вважатимемо ідеально пружним. Тоді при ударі молекули об одну із стінок посудини її швидкість руху зміниться не за зна-

ченням, а тільки за напрямом. Після удару імпульс молекули $p'_2 = -m_0v$. Таким чином, під час удару об стінку посудини імпульс однієї молекули змінюється за значенням: $\Delta p' = p'_2 - p'_1 = -m_0v - m_0v = -2m_0v$. Відповідно до третього закону Ньютона, стінці передається імпульс $\Delta p'_1 = 2m_0v$.

Рухаючись зі швидкістю v , молекула за час Δt проходить відстань $\Delta l = v\Delta t$. Отже, за час Δt до цієї стінки куба долетять тільки ті молекули газу, які знаходяться від неї на відстані, не більшій за Δl . Очевидно, всі ці молекули будуть всередині виділеного нами паралелепіпеда, висота якого дорівнює Δl . Його об'єм $V = \Delta l a^2 = \Delta l S = vS\Delta t$. Оскільки у кожній одиниці об'єму знаходиться n молекул, то всередині всього паралелепіпеда число молекул становитиме $N = nV = nvS\Delta t$.

Проте не всі ці молекули вдаряються об стінку посудини. Через повну безладність свого руху молекули переміщуються у різних напрямках — до кожної із стінок куба. Оскільки молекул дуже багато і рухаються вони абсолютно хаотично, то у напрямі до будь-якої стінки куба в середньому прямує однако-ве число молекул. Отже, з усього числа молекул, що знаходяться всередині паралелепіпеда, до кожної стінки буде рухатися тільки $1/6$ їх частина: $N = \frac{1}{6} m_0 v S \Delta t$. При ударі об стінку молекули передають їй імпульс

$$\Delta p' = \Delta p'_1 N = 2m_0 v \frac{1}{6} n v S \Delta t = \frac{1}{3} n m_0 v^2 S \Delta t.$$

З механіки відомо, що $F\Delta t = \Delta p'$, звідки $F = \frac{\Delta p'}{\Delta t}$, але $p = \frac{F}{S}$, тому $p = \frac{\Delta p'}{S\Delta t}$.

Підставляючи в цю формулу значення $\Delta p'$, отримуємо

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2.$$

Співвідношення $p = \frac{1}{3} n m_0 v^2$ ми отримали, вважаючи, що швидкості руху всіх молекул однакові. Насправді швидкості руху молекул одного і того ж газу різні. Тому в цьому рівнянні квадрат швидкості однієї молекули слід замінити середнім значенням квадратів швидкостей руху всіх молекул. Для цього треба додати квадрати всіх швидкостей і отриманий результат розділити на число молекул:

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}.$$

Якщо добути квадратний корінь з обох частин цього рівняння, то отрима- на у такий спосіб швидкість руху буде називатися **середньою квадратичною швидкістю руху молекул**. Тоді рівняння $p = \frac{1}{3} n m_0 v^2$ слід записати у такому вигляді:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2. \quad (4.4)$$

Поділимо і помножимо на 2 праву частину цього рівняння: $p = \frac{2}{3} n \left(\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \right)$. Очевидно, що $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ є середньою кінетичною енергією поступального руху однієї молекули \bar{E}_k , тому остаточно маємо

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k. \quad (4.5)$$

Отримане співвідношення носить назву *основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів* (рівняння Клаузіуса):

тиск ідеального газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму газу і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають ідеальним газом у молекулярно-кінетичній теорії?
2. Який механізм виникнення тиску газу з погляду молекулярно-кінетичної теорії?
3. Що таке середня квадратична швидкість руху молекул?
4. Запишіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

§ 45 АБСОЛЮТНА ТЕМПЕРАТУРА. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Численними дослідженнями було встановлено, що середня кінетична енергія поступального руху молекул при даній температурі одна і та сама і не залежить від роду газу.

Крім того, було встановлено також, що при нагріванні газу на 1°C середня кінетична енергія поступального руху його молекул збільшується на одне і те саме значення, а саме, на $\Delta E_k = 2,07 \cdot 10^{-23}$ Дж/°C.

Для того щоб обчислити середню кінетичну енергію поступального руху молекул, треба, окрім цієї відносної величини, знати ще хоча б одне абсолютне значення енергії поступального руху. У фізиці достатньо точно визначені ці значення для широкого діапазону температур. Наприклад, при $t = 500^\circ\text{C}$ кінетична енергія поступального руху молекули $E_k = 1600 \cdot 10^{-23}$ Дж.

Знаючи ці дві величини (E_k і ΔE_k), ми можемо як обчислити енергію поступального руху молекул при даній температурі, так і розв'язати обернену задачу — визначити температуру за заданими значеннями енергії.

Визначимо, користуючись цими значеннями, при якій температурі енергія поступального руху молекул буде дорівнювати нулю. Але спочатку дізнаємося, на скільки градусів слід для цього охолодити газ, якщо він мав температуру 500°C :

$$E_{k500} - \Delta E_k t = 0; t = \frac{E_{k500}}{\Delta E_k} = \frac{1600 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{2,07 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}} = 773^\circ\text{C}.$$

Отже, шукана температура буде дорівнювати $500^\circ\text{C} - 773^\circ\text{C} = -273^\circ\text{C}$.

Ця температура взята за нуль абсолютної шкали температур. Ми отримали її, виходячи з припущення, що при цій температурі припиниться поступальний рух молекул. Проте не слід робити висновок, що при цій температурі припиниться рух взагалі. Окрім поступального руху, існують й інші види руху, разом з цим, і сама молекула є складним світом, в якому продовжуватиметься рух, якби навіть і була досягнута така температура.

Англійський учений Кельвін увів абсолютну шкалу температур.

Нульова температура за абсолютною шкалою відповідає **абсолютному нулю**, а кожна одиниця температури за цією шкалою дорівнює градусу на шкалі Цельсія.

Позначається абсолютна температура літерою T . Між температурними шкалами Кельвіна і Цельсія існує такий зв'язок:

$$T = t + 273.$$

У СІ одиницею абсолютної температури є кельвін (К).

Користуючись абсолютною температурою, ми зможемо записати вираз для значення кінетичної енергії поступального руху молекул: $E_k = \Delta E_k T$.

Введемо значення абсолютної температури в основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів: $p = \frac{2}{3} n \Delta E_k T$. У правій частині величина $\frac{2}{3} \Delta E_k$ є сталою. Вона отримала назву сталої Больцмана, позначають її літерою k . Названа так на честь видатного австрійського фізика **Л. Больцмана**.

Визначимо значення сталої Больцмана:

$$k = \frac{2}{3} \Delta E_k = \frac{2}{3} 2,07 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Стала Больцмана пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою у кельвінах.

Підставляючи в основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів сталу Больцмана, отримуємо

$$p = nkT.$$

Проте ми знаємо, що $n = \frac{N}{V}$. Запишемо рівняння для одного моля:

$$p = \frac{N_A}{V} kT. \text{ Отже, } pV = N_A kT.$$

Слід зазначити, що в правій частині добуток $N_A k$ є величиною сталою. Ця величина називається **універсальною газовою сталою** і позначається літерою R .

Таким чином, $R = N_A k$.

З уведенням універсальної газової сталої рівняння матиме вигляд

$$pV = RT.$$

Отримане рівняння встановлює залежність між об'ємом, тиском і температурою газу. Використовуючи його, ми можемо визначити будь-який з трьох газових параметрів за відомими двома. Проте це рівняння справедливе лише для одного моля газу. Припустимо, що у нас не один моль газу, а два. Тоді, очевидно, добуток pV виявився б удвічі більшим, ніж за тих же умов для однієї молекули. Якщо ж газу взяти у кількості n молекул, то відповідний добуток стане більшим в n разів. Отже, для ν молів газу це рівняння набуде вигляду

$$pV = \nu RT.$$

Проте число молів газу можна визначити, знаючи масу газу m і його молярну масу: $\nu = \frac{m}{\mu}$.

Увівши ці позначення, ми отримаємо рівняння, справедливе для будь-якої маси газу m :

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (4.6)$$

У такій формі рівняння стану ідеального газу було вперше отримане Д. І. Менделєєвим, який об'єднав в одній формулі рівняння Клапейрона ($p \frac{V}{T} = \text{const}$) для даної маси газу і закон Авогадро.

Визначимо значення універсальної газової сталої:

$$R = N_A k = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке абсолютний нуль температури? Абсолютна шкала температур?
2. Назвіть одиницю абсолютної температури.
3. Який зв'язок існує між температурою і абсолютною температурою?
4. Що показує стала Больцмана? Яке її значення?
5. Які параметри пов'язує рівняння стану ідеального газу? Чи імена воно носить?
6. Чому дорівнює універсальна газова стала?

§ 46 ГАЗОВІ ЗАКОНИ ДЛЯ ІЗОПРОЦЕСІВ

За допомогою рівняння стану ідеального газу можна дослідити процеси, в яких маса і один з трьох параметрів p , V або T залишаються незмінними.

Кількісні залежності між двома параметрами газу при фіксованому значенні третього параметра називають **газовими законами**.

Процеси, що відбуваються при незмінному значенні одного із параметрів, називають **ізопроесами**.

Ізопроесами дуже поширені в природі і їх часто застосовують у техніці.

Процес зміни стану термодинамічної системи при сталій температурі називають **ізотермічним**.

Для підтримання сталої температури газу, потрібно, щоб він міг обмінюватися теплотою з великою системою — **термостатом**. Термостатом може бути атмосферне повітря, якщо температура його помітно не змінюється протягом процесу.

За рівнянням стану ідеального газу $pV = \frac{m}{\mu} RT$ у будь-якому стані при сталій температурі добуток тиску газу і його об'єму однаковий:

$$pV = \text{const при } T = \text{const і } m = \text{const}. \quad (4.7)$$

Для даної маси газу добуток тиску газу і його об'єму сталий, якщо температура газу не змінюється.

Цей закон установив експериментально англійський учений **Р. Бойль** (1627—1691), а трохи пізніше — французький учений **Е. Маріотт** (1620—1684). Тому його називають **законом Бойля—Маріотта**.

Закон Бойля—Маріотта справджується для будь-яких газів, а також для суміші газів (наприклад, для повітря). Відхилення від цього закону стає істотним, тільки якщо тиск у кілька тисяч разів більший за атмосферний.

Залежність тиску газу від об'єму при сталій температурі зображається графічною кривою, яка називається **ізотермою** (мал. 170). Ізотерма газу виражає обернено пропорційну залежність між тиском і об'ємом. Таку криву в математиці називають гіперболою.

Різним сталим температурам відповідають різні ізотерми. З підвищенням температури тиск відповідно до рівняння стану $pV = \frac{m}{\mu}RT$ збільшується, якщо $V = \text{const}$. Тому ізотерма, що відповідає вищій температурі T_2 , лежить вище від ізотерми, що відповідає нижчій температурі T_1 .

Процес зміни стану термодинамічної системи при сталому тиску називають **ізобарним** (від грецької *барос* — вага).

Відповідно до рівняння $pV = \frac{m}{\mu}RT$ у будь-якому стані газу з незмінним тиском відношення об'єму до температури залишається сталим:

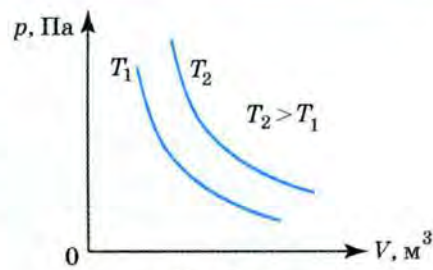
$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const і } m = \text{const} . \quad (4.8)$$

Для даної маси газу відношення об'єму до температури стає, якщо тиск газу не змінюється.

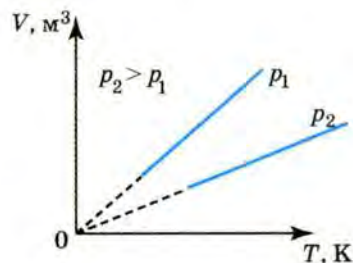
Цей закон установив експериментально у 1802 р. французький учений **Гей-Люссак**, тому його називають **законом Гей-Люссака**. Відповідно до $\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const і } m = \text{const}$ об'єм газу лінійно залежить від температури при сталому тиску: $V = \text{const} \cdot T$.

Ця залежність графічно зображається прямою, яка називається **ізобарою** (мал. 171).

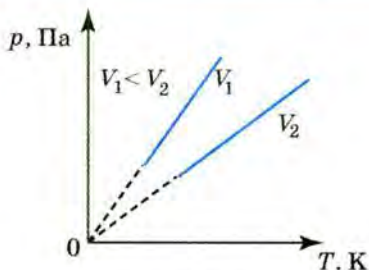
Різним тискам відповідають різні ізобари. Зі зростанням тиску об'єм газу при сталій температурі зменшується за законом Бойля—Маріотта. Тому ізобара, що відповідає вищому тиску p_2 , лежить нижче від ізобари, що відповідає нижчому тиску p_1 .



Мал. 170



Мал. 171



Мал. 172

В області низьких температур всі ізобари ідеального газу перетинаються в точці $T = 0$. Але це не означає, що об'єм газу справді перетворюється в нуль. Усі гази внаслідок значного охолодження перетворюються в рідини, а до рідин рівняння стану $pV = \frac{m}{\mu}RT$ не застосовне.

Процес зміни стану термодинамічної системи при сталому об'ємі називають **ізохорним** (від грецької *хорема* — місткість).

З рівняння стану $pV = \frac{m}{\mu}RT$ випливає, що в будь-якому стані газу з незмінним об'ємом відношення тиску газу до температури залишається сталим:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const і } m = \text{const} . \quad (4.9)$$

Для даної маси газу відношення тиску до температури стає, якщо об'єм газу не змінюється.

Цей газовий закон експериментально встановив у 1787 р. французький фізик Ж. Шарль, тому його називають **законом Шарля**. Відповідно до $\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const і } m = \text{const}$ тиск газу лінійно залежить від температури при сталому об'ємі: $p = \text{const} \cdot T$.

Ця залежність зображається графічно прямою, яка називається **ізохрою** (мал. 172). Різним об'ємам відповідають різні ізохори. Із збільшенням об'єму газу при сталій температурі його тиск відповідно до закону Бойля—Маріотта зменшується. Тому ізохора, що відповідає більшому об'єму V_2 , лежить нижче від ізохори, що відповідає об'єму V_1 .

За рівнянням $p = \text{const} \cdot T$ всі ізохори починаються в точці $T = 0$. Отже, тиск ідеального газу при абсолютному нулі дорівнює нулю.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

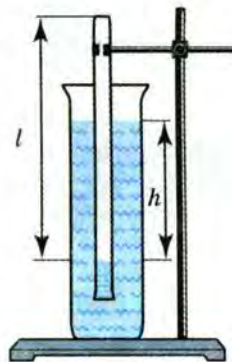
1. Які закони називаються газовими?
2. Як пов'язані тиск і об'єм газу при ізотермічному процесі?
3. У чому полягає суть закону Гей-Люссака?
4. Сформулюйте закон Шарля.
5. Дайте якісне пояснення газових законів на основі молекулярно-кінетичної теорії газів.

Лабораторна робота № 4

Дослідне підтвердження закону Бойля—Маріотта

Мета роботи: за допомогою обладнання (мал.173) експериментально вивчити і перевірити ізотермічний процес (закон Бойля—Маріотта), порівнюючи добутки тисків і об'ємів даної маси газу при сталій температурі.

Прилади і матеріали: скляний циліндр висотою 40 см з водою; скляна трубка довжиною 40—50 см, закрита з одного кінця; лінійка з міліметровими поділками; барометр-анероїд БР-52 (один на клас); штатив універсальний.



Мал. 173

Хід роботи

1. Виміряйте барометром атмосферний тиск p_a (в мм рт. ст.). (Під таким тиском знаходиться повітря в трубці до її занурення у воду.) Результати вимірювань запишіть у таблицю.

2. Закріпіть трубку в лапці штатива і опустіть у воду трубку відкритим кінцем униз на максимальну глибину (мал. 173). Виміряйте довжину стовпчика повітря l у трубці та різницю рівнів води в ній і циліндрі h . Результати вимірювань запишіть у таблицю.

3. Повторіть вимірювання l і h для двох менших глибин занурення трубки. Результати вимірювань запишіть у таблицю (в зошитах).

4. Обчисліть добутки $\left(p + \frac{h}{13,6}\right)l$ для всіх трьох дослідів, порівняйте їх.

Зробіть висновок. Результати обчислень запишіть у таблицю (в зошитах).

Номер дослідів	p_a , мм рт.ст.	h , мм	l , мм	$p = p_a + \frac{h}{13,6}$	$\left(p + \frac{h}{13,6}\right)l = C$	Δp_a , мм рт.ст.	$\Delta h = \Delta l$, мм	ΔC	$\varepsilon, \%$
1						3,5	1,5		
2						3,5	1,5		
3						3,5	1,5		

5. Обчисліть відносну і абсолютну похибки вимірювань: $\varepsilon = \frac{\Delta p_a + \Delta h}{p_a + h} + \frac{\Delta l}{l}$; $\Delta C = \varepsilon C$.

6. Зробіть висновки.

Для допитливих

1. Чому під час дослідів не слід тримати трубку рукою?
2. Від чого залежить стала C у законі Бойля—Маріотта?
3. Чи має істотне значення для дослідів площа поперечного перерізу трубки?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Щоб уникнути окиснення розжареної спіралі лампи розжарювання, з її балона відкачують повітря до тиску $13 \cdot 10^{-2}$ Па. Скільки молекул газів повітря знаходиться в балоні лампи при цьому тиску, якщо місткість балона 10^{-4} м³? Середню квадратичну швидкість хаотичного руху молекул газів повітря вважати такою, що дорівнює 400 м/с.

Дано:

$$p = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$$

$$V = 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$\bar{v} = 400 \text{ м/с}$$

$N = ?$

Розв'язання

З основного рівняння кінетичної теорії газів $p = \frac{1}{3} n m_0 v^2$ визначимо кількість молекул в одиниці

об'єму: $n = \frac{3p}{m_0 v^2}$. Тоді загальне число молекул у балоні

$$N = nV = \frac{3p}{m_0 v^2} V.$$

Для обчислення N треба визначити масу однієї молекули m_0 . Якщо маса одного кіломоля μ і число Авогадро N_A , то маса однієї молекули $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$.

$$\text{Тоді } N = \frac{3pVN_A}{\mu v^2}; N \approx 5,7 \cdot 10^{14}.$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[n] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \frac{1}{\text{моль}}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 \cdot \frac{1}{\text{моль}}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = 1.$$

В і д п о в і д ь: $N = 5,7 \cdot 10^{14}$.

2. У балон місткістю 12 л закачали 1,5 кг азоту при температурі 327 °С. Який тиск буде створювати азот у балоні при температурі 50 °С, якщо 35% азоту буде випущено? Яким був початковий тиск?

Дано:

$$V = 12 \text{ л} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$m_1 = 1,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 327 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_1 = 600 \text{ К}$$

$$t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_2 = 323 \text{ К}$$

$$m_2 = 0,35 m_1$$

$p = ?$

Розв'язання

Напишемо рівняння стану газу для обох ви-

$$\text{падків: } p_1 V = \frac{m_1}{\mu} R T_1; \quad p_2 V = \frac{m_2}{\mu} R T_2;$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1 T_1}{m_2 T_2}; \quad p_1 = \frac{m_1 R T_1}{\mu V}; \quad p_1 = 2,2 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

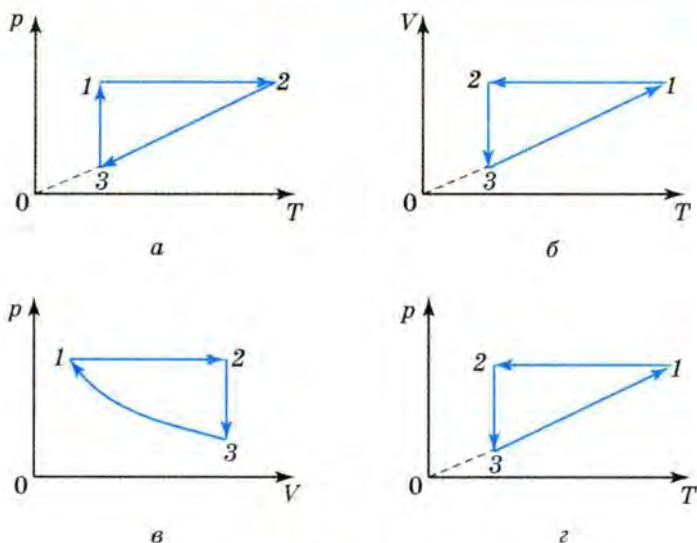
$$[p] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па.}$$

Оскільки $m_2 = m_1 - 0,35 m_1 = 0,65 m_1$, то $p_2 = \frac{0,65 p_1 T_2}{T_1}$; $p_2 = 7,7 \cdot 10^6$ Па.

В і д п о в і д ь: $p_1 = 2,2 \cdot 10^7$ Па; $p_2 = 7,7 \cdot 10^6$ Па.

Рівень А

270. Крапля олії об'ємом $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$ розпливлася по поверхні води, утворивши плівку площею $0,6 \text{ дм}^2$. Визначте діаметр молекули олії та її об'єм.
271. Чому частинки пилу рухаються в повітрі хаотично?
272. Чому навіть в абсолютній тиші можна почути ледь уловимий шум?
273. В якому середовищі броунівський рух інтенсивніший: у краплі води чи у краплі олії? Чому?
274. За молярною масою Оксигену і числом Авогадро визначте масу молекули Оксигену.
275. Визначте масу молекули води (H_2O) і кухонної солі (NaCl).
276. Яка кількість речовини міститься у свинцевому виливку масою $41,4 \text{ кг}$?
277. Який об'єм займають 100 молів ртуті?
278. Яка маса 500 молів вуглекислого газу?
279. В яких шарах атмосфери повітря більш схоже на ідеальний газ: над поверхнею Землі чи на великих висотах?
280. Який тиск на стінки посудини чинять молекули газу, якщо маса газу 3 г , об'єм $0,5 \text{ л}$, а середня квадратична швидкість молекул 500 м/с ?
281. Який тиск чинить газ при температурі 27°C у посудині місткістю 2 л , якщо він складається з $1,0 \cdot 10^{22}$ молекул?
282. Яка середня кінетична енергія хаотичного поступального руху молекули вуглекислого газу при температурі 27°C ?
283. Який тиск чинить газ густиною $6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ на стінки посудини, якщо середня швидкість руху його молекул дорівнює 400 м/с ?
284. Визначте середню квадратичну швидкість молекул Оксигену при температурі 20°C . При якій температурі ця швидкість дорівнює 500 м/с ?
285. Визначте масу аміаку (NH_3) об'ємом 20 м^3 , який знаходиться під тиском $1,93 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температурі 17°C .
286. 12 л вуглекислого газу перебувають під тиском $9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ і при температурі 288 К . Визначте масу газу.
287. У посудині місткістю 500 см^3 знаходиться $0,89 \text{ г}$ водню при температурі 17°C . Визначте тиск газу.
288. Балон якого об'єму треба взяти, щоб вмістити в ньому 10 кг кисню під тиском 200 атм при температурі 40°C ?
289. Визначте масу водню, що знаходиться у балоні об'ємом 20 л під тиском $8,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температурі 17°C .
290. Стан деякого газу сталої маси змінювався за графіком, що показаний на мал. 174 (а—з): назвіть процеси; напишіть рівняння процесів.
291. Газ при тиску $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ займає об'єм $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Який об'єм газ займе при тиску $3,1 \cdot 10^7 \text{ Па}$?
292. Який був тиск газу, якщо його об'єм збільшився від 2 до 5 м^3 , а тиск став $12 \cdot 10^8 \text{ Па}$?
293. Внаслідок ізотермічного стискання об'єм газу зменшився від 6 л до 4 л , а тиск збільшився до $2,25 \text{ атм}$. Який був початковий тиск газу?
294. Газ займає об'єм 2 м^3 при температурі 273°C . Яким буде його об'єм при температурі 546°C і попередньому тиску?
295. Визначте початковий об'єм газу, якщо температура його збільшилась від 127 до 227°C , а кінцевий об'єм став $2,5 \text{ м}^3$.

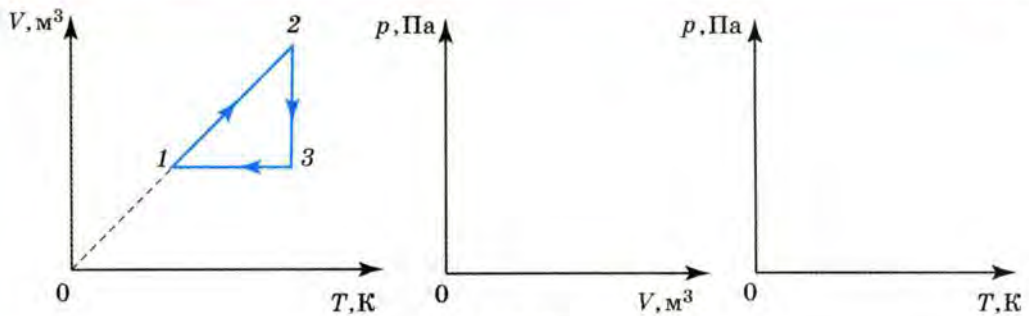


Мал. 174

296. У шинях велосипеда при температурі 12°C тиск повітря $1,5$ атм. Чому дорівнює тиск при температурі 42°C ?

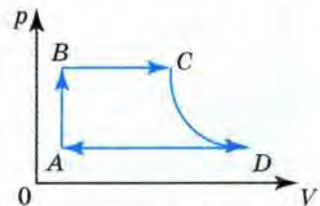
Рівень В

297. Як можна зменшити інтенсивність броунівського руху в краплинах води і олії?
298. Чому метали, подрібнені на частинки, розмір яких становить кілька мікрометрів, заповнюючи всю посудину з водою, повністю не осідають на дно?
299. Кристал мідного купоросу підвішений на нитці і вміщений у посудину, заповнену водою. Чи однаково швидко молекули CuSO_4 будуть дифундувати у воду вгору і вниз? Відповідь обґрунтувати.
300. Визначте лінійні розміри молекул води і золота.
301. Знаючи сталу Авогадро N_A , густину ρ даної речовини і її молярну масу μ , виведіть формулу для розрахунку числа молекул в одиниці об'єму.
302. Вважаючи, що діаметр молекули Гідрогену дорівнює приблизно $2,3 \cdot 10^{-10}$ м, обчисліть, якої довжини була б нитка, якщо б усі молекули, що містяться у 1 мг цього газу, розташувати щільно в один ряд?
303. Оцініть об'єм молекули води, знаючи, що 10 молів її займають об'єм $1,8 \cdot 10^{-4}$ м³.
304. Визначте кількість речовини водню, що заповнює посудину об'ємом 3 л, якщо концентрація молекул газу в посудині $2 \cdot 10^{18}$ м⁻³.
305. Гранично допустима концентрація молекул пари ртуті у повітрі $3 \cdot 10^{16}$ м⁻³. Визначити, при якій масі ртуті в одному кубічному метрі повітря виникає небезпека отруєння.
306. Визначте відношення середніх квадратичних швидкостей молекул Оксигену і Нітрогену при однаковій температурі.



Мал. 175

307. Середня квадратична швидкість молекули вуглекислого газу при температурі 0°C дорівнює 360 м/с . Яку швидкість матиме молекула при температурі 127°C ?
308. При якій температурі молекули Гелію мають таку середню квадратичну швидкість, як молекули Гідрогену при температурі 15°C ?
309. Яка середня квадратична швидкість броунівських частинок діаметром 1 мкм при температурі 0°C ? Густина речовини частинок 1 г/см^3 .
310. Визначте середню кінетичну енергію поступального руху молекул Гелію та Аргону при температурі 1200 К .
311. Визначте температуру газу, якщо середня кінетична енергія поступального руху його молекул дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
312. Яка вага водню, що заповнює повітряну кулю, якщо її об'єм 1400 м^3 , тиск газу $9,6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ і температура 7°C ?
313. Обчисліть густину водню і кисню за нормальних умов. Результати обчислень порівняйте з табличними даними.
314. Яку густину має гелій при температурі 127°C , під тиском $8,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$?
315. При температурі 10°C і нормальному атмосферному тиску густина деякої газоподібної речовини дорівнює $0,25 \text{ кг/м}^3$. Яка молярна маса цієї речовини?
316. Чому дорівнює об'єм ідеального газу з кількістю речовини 1 моль за нормальних умов?
317. Побудувати графіки процесів у відповідних координатах (мал. 175).
318. На мал. 176 зображено замкнутий цикл. Ділянка CD відповідає ізотермі. Накресліть цю діаграму в координатах pT і VT .
319. Газ повільно стиснули від об'єму 6 л до об'єму 4 л . Тиск газу внаслідок цього підвищився на 2 атм . Який був початковий тиск газу?
320. Посередині циліндра, закритого з обох боків, міститься поршень. Тиск газу в обох частинах циліндра $7,5 \text{ Па}$. Поршень повільно зсувають так, щоб об'єм газу праворуч зменшився вдвічі. Визначте різницю тисків.
321. Повітря нагнітають у порожній балон місткістю 40 л . Протягом якого часу балон буде накачано до тиску 15 атм , якщо компресор всмоктує 5 м^3 повітря за хвилину?
322. Газ, що виходить із топки у трубу, охолоджується від 1150°C до 200°C . У скільки разів зменшується їх об'єм?



Мал. 176

323. У приміщенні об'ємом 20 м^3 температура повітря знизилася від $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск дорівнює 1 атм . Чому і на скільки збільшилася маса повітря в приміщенні?
324. Є повітря під нормальним атмосферним тиском і при температурах $25, 50, 100, 200, 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Побудувати графік залежності густини повітря від температури.
325. До якої температури треба ізохорно нагріти газ, що має температуру $0 \text{ }^\circ\text{C}$, щоб його тиск збільшився в n разів?
326. Газ за нормальних умов займає об'єм 2 л . На скільки збільшиться тиск газу при підвищенні його температури до $77 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо об'єм газу незмінний?
327. Газ у посудині знаходиться під тиском $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температурі $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначте тиск газу після того, як половину маси газу було випущено з посудини і температура знизилася на $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

§ 47 ПАРООУТВОРЕННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ. НАСИЧЕНА І НЕНАСИЧЕНА ПАРА

Молекули рідини, які безперервно і хаотично рухаються, весь час обмінюються енергією одна з одною. Внаслідок цього кінетична енергія одних молекул зменшується, а інших збільшується. Оскільки поступальний рух молекул рідини здійснюється безладно, частина молекул поверхневого шару рухається у напрямі до межі рідини з повітрям. Ті з них, у яких кінетична енергія виявляється більшою, ніж середня кінетична енергія інших молекул, можуть подолати їх притягання і вилетіти за межі поверхневого шару рідини. Таким чином відбувається процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний.

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називається **пароутворенням**.

Молекули, що вилетіли за межі поверхневого шару рідини, утворюють пару цієї рідини.

Існує два види пароутворення: випаровування і кипіння.

Випаровування — це пароутворення, що відбувається з вільної поверхні рідини.

Швидкість випаровування (кількість молекул рідини, що випаровуються за одиницю часу) залежить від роду рідини, її температури і від площі вільної поверхні рідини.

Наллємо в три однакові склянки однакові об'єми ефіру, спирту і води. Легко встановити, що першим випарується ефір, потім — спирт і останньою — вода.

Нагріта рідина завжди випаровується швидше, ніж холодна. Цей факт пояснюється тим, що з підвищенням температури рідини збільшується середня кінетична енергія її молекул і тому значна кількість молекул може подолати молекулярні сили і покинути межі рідини. Із збільшенням вільної поверхні рідини кількість молекул, що покидають рідину, збільшується і швидкість випаровування зростає. Крім того, швидкість випаровування рідини залежить від густини пари над її вільною поверхнею. Чим більша густина пари, тим частіше молекули пари стикаються одна з

одною і повертаються в рідину: швидкість випаровування зменшується. Якщо пару віддаляють від поверхні рідини, то випаровування відбувається інтенсивніше (наприклад, під час вітру ґрунт висихає швидше).

Випаровування може відбуватися і з поверхні твердих тіл (ми відчуваємо запах нафталіну, білизна висихає на морозі тощо). Це явище називається **сублімацією**.

Молекули пари, що знаходяться над вільною поверхнею рідини, здійснюють безперервний хаотичний рух точно так, як і молекули газів. При цьому частина молекул пари внаслідок хаотичності свого руху повертається назад всередину рідини.

Процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називається **конденсацією**.

Пароутворення і конденсація відбуваються одночасно при будь-яких температурах, але з підвищенням температури зростає швидкість випаровування, а при зниженні температури, навпаки, інтенсивніше відбувається конденсація. У гігантських масштабах здійснюються взаємні перетворення води і пари на Землі. Вода постійно випаровується з поверхні океанів, морів і річок, з поверхні ґрунту і листя рослин, шкіри тварин і людей. При зниженні температури повітря водяна пара, що знаходиться в ньому, конденсується у вигляді крапельок води (роса, дощ) або найдрібніших частинок льоду (сніг, град) (мал. 177, а, б).

У міру випаровування рідини кількість молекул пари над її вільною поверхнею зростає. Чим більше стає молекул пари, тим більша їх кількість повертається всередину рідини і, нарешті, може наступити такий момент, коли кількість молекул, що покидають рідину і повертаються у неї, стає однаковою, настає стан рухомої або **динамічної рівноваги**.

У стані динамічної рівноваги процеси випаровування і конденсації не припиняються: між рідиною і паром відбувається безперервний обмін молекулами в однакових кількостях і з цієї причини загальне число молекул рідини і пари залишається незмінним. У стані динамічної рівноваги кількість молекул пари в кожній одиниці об'єму досягає свого максимального значення.

Пара, що знаходиться в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називається **насиченою**.



а



б

Мал. 177

Пара, що не знаходиться в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називається **ненасиченою**.

Що відбуватиметься з насиченою парою, якщо зменшувати об'єм, який вона займає, наприклад, стискати пару, що перебуває в рівновазі з рідиною у циліндрі під поршнем, підтримуючи температуру всередині циліндра сталою?

Під час стискання пари рівновага порушується. Густина пари у перший момент трохи збільшується і з газу в рідину починає переходити більша кількість молекул, ніж з рідини в газ. Адже кількість молекул, що покидають рідину за одиницю часу, залежить лише від температури, і стискання пари не змінює цієї кількості. Процес триває доти, поки знову не встановиться рівновага і густина, а отже, і концентрація молекул не набуде попереднього значення. Отже, **концентрація молекул насиченої пари не залежить від об'єму при сталій температурі**.

Оскільки тиск пропорційний концентрації $p = nkT$, то через незалежність концентрації (або густини) насиченої пари від об'єму впливає незалежність тиску насиченої пари від об'єму, який вона займає.

Незалежний від об'єму тиск пари p_n , при якому рідина перебуває в рівновазі зі своєю парою, називають **тиском насиченої пари**.

Якщо стискати насичену пару, то дедалі більша її частина буде переходити у рідкий стан. Рідина даної маси займає менший об'єм, ніж пара такої самої маси. Внаслідок цього об'єм пари зменшується при незмінній густині пари.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке пароутворення? Випаровування? Конденсація?
2. Яку пару називають насиченою? Ненасиченою?
3. Що таке динамічна рівновага?
4. Який тиск називають тиском насиченої пари?

§ 48 ЗАЛЕЖНІСТЬ ТИСКУ НАСИЧЕНОЇ ПАРИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ. КИПІННЯ

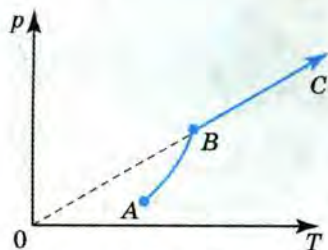
Стан насиченої пари наближено описується рівнянням стану ідеального газу $pV = \frac{m}{\mu}RT$, а його тиск наближено визначається такою формулою:

$$p_n = nkT.$$

З підвищенням температури тиск зростає. Оскільки **тиск насиченої пари не залежить від об'єму**, отже, він **залежить тільки від температури**.

Проте ця залежність $p_n(T)$, визначена експериментально, не є прямо пропорційною, такою, як для ідеального газу при сталому об'ємі.

З підвищенням температури тиск насиченої пари зростає швидше, ніж тиск ідеального газу (мал. 178, ділянка кривої AB).



Мал. 178

Це відбувається з такої причини. Під час нагрівання рідини з паром у закритій посудині частина рідини перетворюється на пару. Згідно з формулою $p_n = nkT$ тиск пари зростає внаслідок не тільки підвищення температури, а й збільшення концентрації молекул (густини) пари.

Збільшення тиску з підвищенням температури головним чином зумовлюється саме збільшенням концентрації. Основна розбіжність у поведінці ідеального газу і насиченої пари полягає в тому, що із зміною температури пари в закритій посудині (або зі зміною об'єму при сталій температурі) змінюється маса пари. Рідина частково перетворюється на пару або, навпаки, пара частково конденсується. З ідеальним газом нічого подібного не відбувається.

Якщо вся рідина випарується, то при дальшому нагріванні пара стає вже ненасиченою і її тиск при сталому об'ємі зростає прямо пропорційно абсолютній температурі (ділянка *BC* на мал. 178).

Кипіння. Пароутворення може відбуватися не тільки з вільної поверхні рідини, а й усередині самої рідини.

Процес пароутворення, що відбувається в об'ємі всієї рідини, називається кипінням.

Усередині рідини завжди існує певна кількість розчинених газів (повітря). При підвищенні температури розчинність газів зменшується і тому при нагріванні води розчинені в ній гази, осідаючи на стінках і дні посудини, утворюють бульбашки (мал. 179, *a*). Молекули рідини внаслідок випаровування з поверхні цих бульбашок проникають усередину них, де виявляються оточеними молекулами газу і, отже, знаходяться в таких самих умовах, як і ті молекули, які відриваються від вільної поверхні рідини. Молекули рідини, що потрапили всередину бульбашок, стають молекулами пари і досить швидко пара всередині бульбашок стає насиченою, а бульбашки збільшуються у розмірах. Під дією сили Архімеда бульбашка, долаючи сили молекулярного притягання, відривається від стінок посудини і піднімається вгору. Верхні шари рідини, не встигнувши ще достатньою мірою

*a**б*

Мал. 179

прогрітися, холодніші за нижні, і водяна пара, що знаходиться всередині бульбашки, спливає вгору, конденсується; частина газів у холодніших шарах розчиняється у воді, і бульбашка, зменшуючись у розмірах, зникає. До того часу, доки верхні шари рідини холодніші за нижні, бульбашки, так би мовити, закриваються всередині рідини. Цей процес супроводжується звуковими явищами: закипаюча вода шумить.

Коли прогріються і верхні шари рідини, у повітряних бульбашках, що піднімаються вгору, конденсація вже не відбуватиметься, бульбашки будуть не зменшуватися, а, навпаки, збільшуватися в об'ємі. Досягаючи поверхні, бульбашки з шумом і бульканням лопаються, викидаючи в навколишній простір значну кількість пари: рідина кипить (мал. 179, б).

Коли бульбашка перебуває на дні посудини, молекули водяної пари, що знаходяться всередині, створюють порівняно високий тиск p_6 . Він дорівнює сумі зовнішнього тиску рідини p_1 і додаткового тиску Δp , що виникає на межі бульбашки з рідиною: $p_6 = p_1 + \Delta p$.

Коли бульбашки піднімаються вгору, її розміри збільшуються і кривизна її поверхні стає незначною. Тому додатковим тиском можна знехтувати. Отже, коли бульбашка пари досягає вільної поверхні рідини, тиск насиченої водяної пари в її середині дорівнює зовнішньому тиску.

Таким чином, **кипіння рідини настає за умови, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску на її вільну поверхню, за однакової температури всіх шарів рідини.**

Температура, при якій тиск насиченої водяної пари всередині рідини дорівнює зовнішньому тиску, називається **температурою кипіння**.

Температура кипіння залежить від природи рідини і для різних рідин різна.

Оскільки кипіння настає за умови, що тиск насиченої пари всередині бульбашки дорівнює зовнішньому тиску на вільну поверхню рідини, то при зменшенні зовнішнього тиску температура кипіння рідини знижується, і навпаки.

Помістимо склянку з водою, підігрітою до температури 70—80 °С, під ковпак повітряного насоса. У міру відкачування повітря з-під ковпака тиск на поверхню води в склянці зменшується, і вода при деякому тиску закипає при температурі, нижчій ніж 100 °С. У той же час при нормальному атмосферному тиску вода закипає при 100 °С.

Температура кипіння рідини при нормальному атмосферному тиску називається **точкою кипіння**.

У паросилових установках вода нагрівається під тиском, вищим за атмосферний, і тому температура її кипіння значно перевищує 100 °С. Так, при тиску 1,5 МПа температура кипіння води дорівнює приблизно 200 °С. На сьогодні в техніці застосовуються установки (мал. 180), в яких температура кипіння води і, отже, отриманої пари дорівнює 650 °С, а тиск пари досягає 30 МПа.

Пара високого тиску і температури застосовується в медицині для стерилізації хірургічних інструментів, білизни, медикаментів тощо. При обробці їх парою при температурі, вищій ніж 110 °С, мікроорганізми, що знаходяться на їх поверхні, серед яких можуть бути і хвороботворні, гинуть; матеріали та інструменти стають стерильними.



Мал. 180

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як залежить тиск від об'єму, температури, концентрації молекул пари?
2. Що таке кипіння? Коли воно настає?
3. Яку температуру називають температурою кипіння?
4. Що таке точка кипіння?
5. Розкажіть, яку роль відіграє кипіння рідини при високих температурах.

§ 49 ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

У повітрі, що оточує нас, завжди міститься деяка кількість водяної пари. **Кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря, називається абсолютною вологістю повітря.**

Якщо в повітрі об'ємом V міститься водяна пара масою m , то, очевидно, в кожній одиниці об'єму повітря кількість водяної пари буде дорівнювати: $\rho = \frac{m}{V}$.

Таким чином, абсолютна вологість повітря вимірюється густиною водяної пари, що знаходиться у ньому, і, отже, в СІ одиницею абсолютної вологості повітря є 1 кг/м^3 .

Як правило, водяна пара в повітрі є ненасиченою. Ненасичену пару можна перевести в стан насичення двома шляхами: перший полягає у збільшенні густини пари при сталій температурі, а другий — у зниженні температури пари при її сталій густині.

Температура, при якій водяна пара, що знаходиться в атмосферному повітрі, стає насиченою, називається точкою роси.

Річ у тім, що коли водяна пара стає насиченою, частина її конденсується у вигляді крапельок роси, туману або інею.

Кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря в стані насичення (при точці роси), називається максимальною вологістю повітря.

Максимальна вологість повітря вимірюється густиною насиченої водяної пари. Густина насиченої водяної пари при різних температурах визначається експериментально і наводиться в таблицях (табл. 3).

Наприклад, густина ненасиченої водяної пари при температурі 20°C дорівнює $13,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. Ця пара при температурі 16°C стає насиченою (випадає роса). Отже, її густина і абсолютна вологість $\rho = 13,6 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3 = 13,6 \text{ г/м}^3$. (Для зручності абсолютну вологість зазвичай вимірюють у г/м^3 .)

Для визначення точки роси користуються конденсаційним гігрометром, який складається з металевої камери, укріпленої на штативі (мал. 181). Камера має два отвори: один для термометра, а інший для продування повітря. Передня стінка камери дзеркаль-



Мал. 181

но відполірована, навколо неї встановлена відполірована кільцева рамка, виготовлена з того самого матеріалу, що і камера, але відокремлена від неї теплоізоляційною прокладкою. Камеру наполовину заповнюють ефіром і за допомогою груші через камеру продувають повітря. Внаслідок цього ефір інтенсивно випаровується, а стінки камери сильно охолоджуються, водяна пара, що міститься у повітрі, стикаючись з ними, конденсується у вигляді найдрібніших крапельок роси. При появі роси відполірована поверхня камери тьмяніє, а поверхня кільця залишається блискучою. Таким чином встановлюється момент появи роси, який фіксує термометр. Це і буде точка роси. Потім за допомогою таблиць визначають абсолютну вологість повітря.

Тиск і густина насиченої пари при різних температурах

Таблиця 3

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$		$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-10	259,9	2,14		17	1936,8	14,5
-5	402,4	3,2		18	2063,5	15,4
0	610,5	4,84		19	2196,8	16,3
1	656,1	5,22		20	2338,1	17,3
2	758,4	5,60		21	2486,0	18,3
3	797,3	5,98		22	2643,3	19,4
4	812,1	6,40		23	2808,6	20,6
5	871,1	6,84		24	2983,3	21,8
6	934,4	7,3		25	3167,2	23,0
7	1001,1	7,8		26	3360,5	24,4
8	1073,1	8,3		27	3567,1	25,8
9	1147,7	8,8		28	3779,1	27,2
10	1227,7	9,41		29	4004,3	28,7
11	1300,7	10,0		30	4241,6	30,3
12	1402,3	10,7		40	7374,2	51,2
13	1519,6	11,4		50	1234,3	82,9
14	1598,3	12,1		90	7011,4	423,3
15	1704,9	12,8		100	101303	598
16	1816,9	13,6		200	156000	7870

Вологість повітря фіксується як максимально можлива, коли водяна пара, що міститься в атмосфері, досягає стану насичення. Тому, чим ближче водяна пара, що міститься у повітрі, до стану насичення, тим більш вологе повітря.

Відношення абсолютної вологості повітря ρ до його максимальної вологості ρ_n при даній температурі називається **відносною вологістю повітря**:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100 \% \quad (4.10)$$

Атмосферне повітря — це суміш різних газів і водяної пари. Отже, сумарний тиск повітря на тіло складається з тиску кожного газу, що у ньому міститься.

Тиск, який би чинила водяна пара, коли б не було інших газів, називають **парціальним тиском** водяної пари.

Парціальний тиск водяної пари виражають в одиницях тиску — паскалях або міліметрах ртутного стовпа. Тому наведемо інше визначення відносної вологості повітря.

Відносною вологістю повітря φ називають відношення парціального тиску p водяної пари, яка є у повітрі при даній температурі, до тиску p_n насиченої пари при тій самій температурі:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} 100 \% \quad (4.11)$$

Відносну вологість повітря зазвичай виражають у відсотках. Якщо відносна вологість повітря дорівнює 70 %, це означає, що абсолютна вологість становить 70 % максимально можливої при даній температурі.

Відносна вологість вимірюється психрометром (мал. 182). Він складається з двох однакових термометрів, закріплених на підставці. Резервуар одного з термометрів обгорнутий марлею й опущений у посудину з водою. Вода по марлі (явище капілярності) піднімається вгору і зволожує її

(тому один із термометрів називають вологим, а другий — сухим). Сухий термометр вимірює температуру навколишнього повітря. Якщо водяна пара не насичує простір, то вода випаровується з марлі, вологий термометр охолоджується і його покази стають нижчими за покази сухого.

Різниця температур між показами сухого і вологого термометрів називається **психрометричною різницею**.



Мал. 182

Таблиця 4

Психрометрична таблиця

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого і вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відносна вологість, %											
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Чим вологіше повітря, тим менша психрометрична різниця. Таким чином, за значенням психрометричної різниці можна судити про вологість повітря. При насиченні повітря водяною паром обидва термометри показують однакову температуру (психрометрична різниця дорівнює нулю). За психрометром визначають температуру повітря і психрометричну різницю, а потім за психрометричною таблицею (див. табл. 4) знаходять відносну вологість повітря.

Вологість повітря суттєво впливає на комфортність життя людини. В інтервалі температур 25—30 °С нормальна життєдіяльність людини зберігається при відносній вологості повітря 40—60 %. При зниженні вологості до 30 % повітря стає сухим. У сухому повітрі різко посилюється випаровування вологи зі слизових оболонок, виникають неприємні відчуття сухості у роті й горлі, утворюються глибокі тріщини на губах, знижуються захисні функції верхніх дихальних шляхів.

Підвищена вологість (вища за 70 %) негативно впливає на організм людини як при високих, так і при низьких температурах. При високій температурі повітря і підвищеній вологості людина сильно пітніє, але волога з поверхні тіла не випаровується, що призводить до перегрівання організму і «теплого удару». При низьких температурах підвищена вологість повітря, навпаки, призводить до переохолодження організму, оскільки у вологому повітрі різко збільшуються втрати енергії шляхом конвекції і теплопровідності.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення абсолютної, максимальної, відносної вологості повітря.
2. Що таке точка роси?
3. Що таке парціальний тиск?
4. Якими приладами вимірюють вологість повітря? Яка їх будова?
5. Для чого використовується психрометрична таблиця?
6. Наведіть відомі вам приклади впливу вологості повітря на людину.

Лабораторна робота № 5

Вимірювання відносної вологості повітря

Мета роботи: навчитися вимірювати відносну вологість повітря.

На мал. 183 зображено прилад для вимірювання відносної вологості повітря — волосяний гігрометр. Він складається з таких частин: 1 — знежирена волосина, верхній кінець якої закріплений у регулюючому затискачі, а нижній — на блоці 3, що має вісь обертання. На осі встановлені стрілка 2 і противага 4. При підвищенні вологості волосина видовжується, і стрілка повертається на відповідний кут, фіксуючи значення відносної вологості повітря.

Прилади і матеріали: психрометр, волосяний гігрометр, термометр.

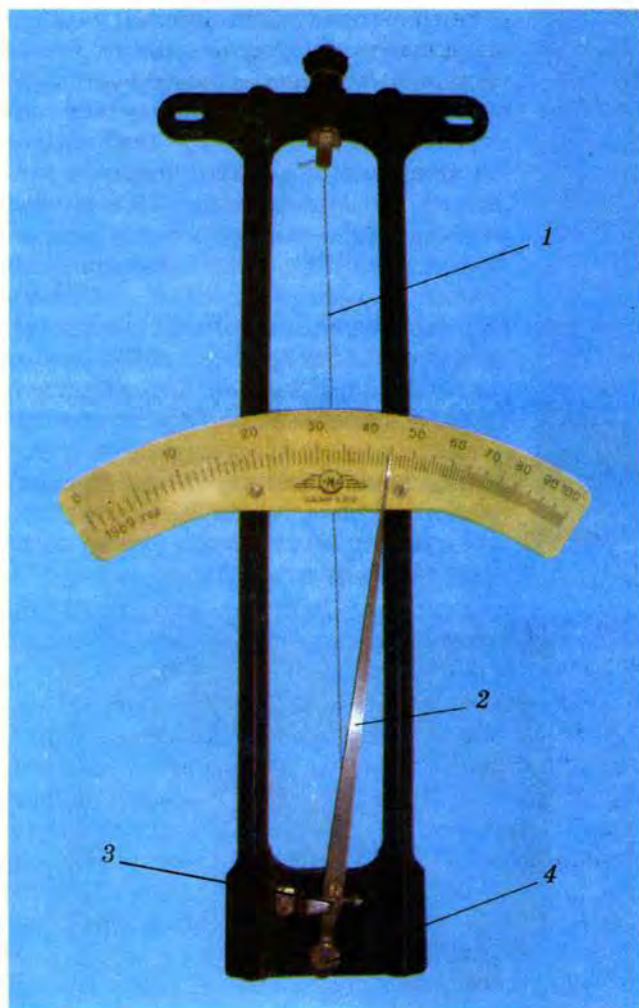
Хід роботи

1. Розгляньте уважно психрометр і гігрометр. Визначте ціну поділки шкал термометрів і гігрометра.

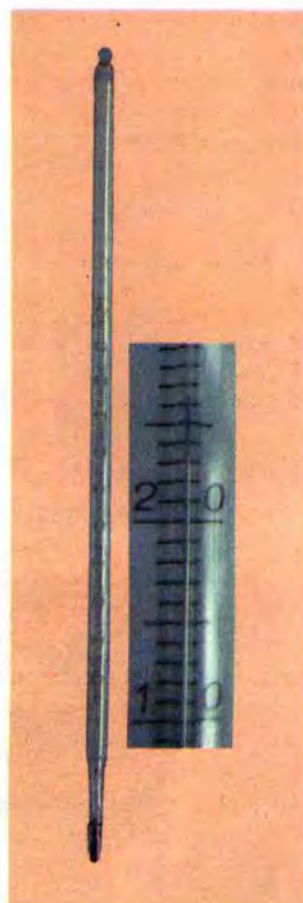
2. Використовуючи мал. 183 і 184, визначте значення точки роси.
3. Підготуйте психрометр і гігрометр до роботи.
4. Визначте відносну вологість за допомогою психрометра, скориставшись психрометричною таблицею. Виміряйте термометром температуру повітря в класі. Визначте значення точки роси.
5. Виміряйте відносну вологість повітря за допомогою волосяного гігрометра. Порівняйте отримані результати з попередніми.
6. Зробіть висновки.

Для допитливих

Відвідайте музей або картинну галерею. Прослідкуйте, які прилади, крім експонатів або картин, знаходяться в приміщенні. Чому саме вони використовуються і для чого?



Мал. 183



Мал. 184

§ 50 ВЛАСТИВОСТІ РІДИН. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ РІДИНИ

Вивчаючи фізику, ви ознайомилися з багатьма силами, які існують в природі. Але пригадайте випадок, коли з водопровідного крана через певний час падає крапля за краплею у раковину, викликаючи неприємні відчуття. *Що ж утримує певний час краплю?*

Спробуємо простежити, як утворюється крапля біля нещільно закритого крана. Придивіться уважно, як поступово збільшується крапля, утворюється звуження — так звана шийка, а потім шийка і крапля відриваються (мал. 185). Тепер уявіть собі, ніби вода вміщена в еластичну



Мал. 185

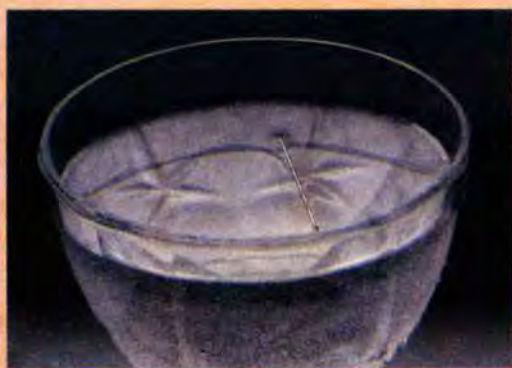
торбинку і, якщо міцність торбинки стає недостатньою для утримання великої маси води, ця торбинка розривається. Насправді, звичайно, нічого у краплі немає, крім води, але поверхневий шар води нагадує розтягнуту еластичну плівку. Аналогічно плівка мильної бульбашки нагадує тонку гуму дитячої кульки (мал. 186).

Обережно покладіть швацьку голку на поверхню води. Поверхнева плівка вгнеться і не дасть голці потонути (мал. 187). З тієї самої причини легкі комахи-вodomірки можуть швидко ковзати по поверхні води, як ковзанярі по льоду (мал. 188).

Угнута плівка не дає вилитися воді, обережно налитій у густе сито. Тканина — це своєрідне сито, утворене переплетенням ниток. Поверхневий натяг утруднює просочування води крізь тканину, й тому вона відразу не промокає.



Мал. 186



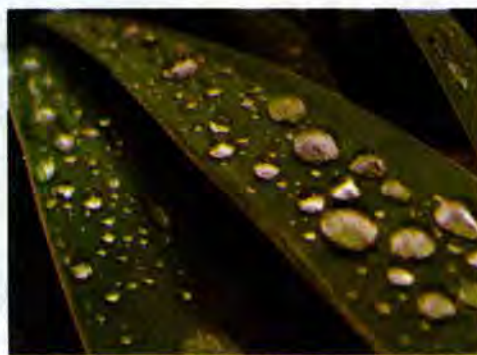
Мал. 187

Поверхнева плівка, намагаючися скоротитися, надавала б рідині сферичної форми, якби не притягання до Землі. Чим менша крапелька, тим більшу роль відіграють поверхневі сили порівняно із силою тяжіння. Тому маленькі крапельки роси (мал. 189) близькі за формою до кулі. Під час вільного падіння дощові краплі перебувають у невагомості і тому майже кулясті.



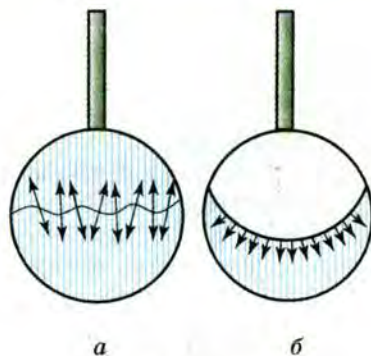
Мал. 188

Коли виникає стан невагомості у космічному кораблі, то кулястої форми набувають не тільки окремі краплі, а й великі маси рідини.



Мал. 189

Сили поверхневого натягу виникають внаслідок того, що молекули води чи іншої рідини, які притягаються одна до одної, намагаються зблизитися. Кожна молекула на поверхні притягується рештою молекул, які містяться всередині рідини, і тому має тенденцію занурюватися вглиб. Оскільки рідина текуча внаслідок перестрибувань молекул з одного місця на інше, то вона набуває форми, при якій кількість молекул на поверхні є мінімальна. А, як відомо, мінімальну площу поверхні заданого об'єму має куля. Отже, площа поверхні скорочується, і це спричиняє поверхневий натяг.



Мал. 190

Виявляється, що походження поверхневих сил зовсім не таке, як пружних сил розтягнутої гумової плівки. Коли скорочується гума, пружна сила ослаблюється, сили ж поверхневого натягу зовсім не змінюються із скороченням поверхні плівки, тому що густина рідини, а отже, й середня відстань між молекулами на поверхні не змінюються.

Візьмемо дротяне кільце, до країв якого вільно, без натягу, прив'язана нитка. Опустимо кільце у мильний розчин, по обидва боки від нитки виявиться мильна плівка (мал. 190, а). Нитка буде вільно лежати на мильній плівці: сили поверхневого натягу взаємно урівноважуються з обох боків нитки. Прорвемо плівку з одного боку від нитки. Під дією сил поверхневого натягу плівка скоротиться і, діючи на нитку, натягне її по всій довжині — нитка набере форму дуги кола (мал. 190, б). Сили поверхневого натягу діють уздовж усієї замкнутої лінії (контуру), що обмежує вільну

поверхню рідини; вони завжди напрямлені перпендикулярно до цього контуру і лежать на поверхні рідини, якщо вона горизонтальна.

Величина, що вимірюється силою поверхневого натягу, яка діє на кожну одиницю довжини контуру, що обмежує вільну поверхню рідини, називається **коефіцієнтом поверхневого натягу**.

Коефіцієнт поверхневого натягу характеризує розподіл сил поверхневого натягу вздовж контуру, що обмежує вільну поверхню рідини:

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad (4.12)$$

де F — сила поверхневого натягу; l — довжина контуру.

Одиницею коефіцієнта поверхневого натягу рідини в СІ є **ньютон на метр (Н/м)**.

Коефіцієнти поверхневого натягу деяких рідин наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти поверхневого натягу рідин (при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

Рідина	σ , мН/м	Рідина	σ , мН/м
Вода	73	Нафта	30
Гас	24	Ртуть	510
Мильний розчин	40	Спирт	22

Коефіцієнти поверхневого натягу залежать від природи рідин і температури, а також від наявності домішок. Оскільки щільність упаковки частинок у різних рідин неоднакова, виникають певні відмінності й у значенні молекулярних сил. Цим і пояснюється залежність коефіцієнта поверхневого натягу від природи рідини.

З підвищенням температури збільшуються середні відстані між молекулами рідини, молекулярні сили зменшуються, і тому при підвищенні температури зменшується коефіцієнт поверхневого натягу рідин. Це можна спостерігати на такому досліді. Насипавши на поверхню води порошок лікоподію, злегка торкнемося її поверхні металевим стержнем тієї ж температури, що і вода. Частинки лікоподію залишаються нерухомими. Торкнемося тепер поверхні води розжареним стержнем. Частинки лікоподію розбігаються від центра посудини до її країв, де температура води нижче і сили поверхневого натягу більші.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Наведіть відомі вам приклади дії сил поверхневого натягу.
2. Чим подібні і чим розрізняються сили поверхневого натягу і сили пружності?
3. Що називають коефіцієнтом поверхневого натягу?
4. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
5. Що називають силою поверхневого натягу?

§ 51 ЗМОЧУВАННЯ. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

Молекули рідини, які перебувають на межі з твердим тілом, взаємодіють як з молекулами рідини, так і з частинками твердого тіла, тому можуть спостерігатися явища змочування або незмочування.

Змочування — це явище, яке виникає внаслідок взаємодії рідини з молекулами твердих тіл і зумовлює викривлення поверхні рідини біля поверхні твердого тіла.

Силами взаємодії між молекулами рідини і твердого тіла на відміну від сил притягання між молекулами рідини і газу знехтувати не можна. Форма поверхні рідини, що прилягає до твердого тіла, залежить від того, які сили притягання більші: між молекулами рідини і твердого тіла чи між молекулами самої рідини.

У першому випадку рідина змочувальна (її форма біля стінки посудини така (мал. 191, а), що кут θ між площиною, дотичною до поверхні рідини, і стінкою гострий (рідина прилипає до стінки). У другому випадку рідина не змочує тверду поверхню і кут θ (мал. 191, б) тупий (рідина відходить від стінки).

Розглянемо лише випадки повного змочування (кут $\theta = 0^\circ$) і повного незмочування (кут $\theta = 180^\circ$), щоб пояснити явища, обумовлені поведінкою рідин у вузьких трубках — капілярах (з латинської *капіллярис* — волосяний).

Під капілярними явищами розуміють піднімання або опускання рідини у вузьких трубках — капілярах — порівняно з її рівнем у широких трубках.

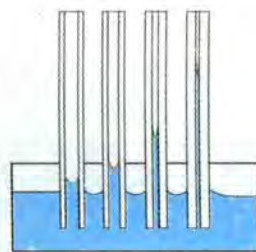
Змочувальна рідина (наприклад, вода у скляній трубці) піднімається по капіляру. Причому чим менший радіус трубки, тим на більшу висоту вона підніметься (мал. 192). Якщо розглядати викривлену поверхню рідини у капілярі через лупу, то вона нагадуватиме розтягнуту гумову плівку, прикріплену до стінок трубки (мал. 193).

У капілярах вигнуту поверхню рідини при повному змочуванні і незмочуванні можна вважати півсферою, радіус якої дорівнює каналу трубки r .

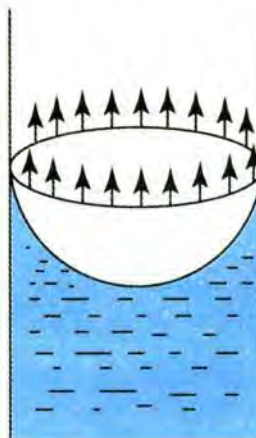
Уздовж межі поверхневого шару, що має форму кола, на рідину діє сила поверхневого натягу $F = \sigma l$. Оскільки довжина кола $l = 2\pi r$, то ця сила дорівнює: $F = \sigma 2\pi r$.



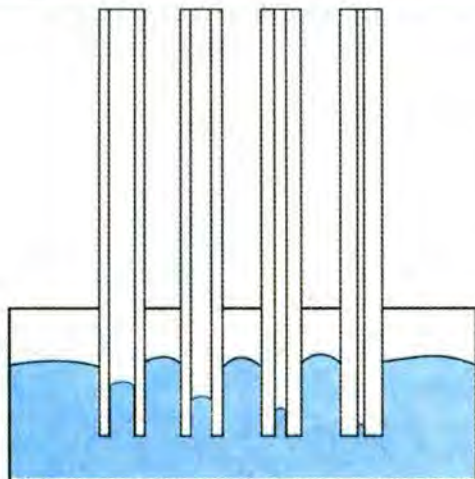
Мал. 191



Мал. 192



Мал. 193



Мал. 194

r — радіус трубки (капіляра); h — висота підняття рідини в капілярі.

Рідина, яка не змочує стінки капіляра (наприклад, ртуть у скляній трубці), опускається нижче від рівня рідини в широкій посудині (мал. 194). Глибина h , на яку вона опускається, також визначається формулою $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

Тіла, пронизані великою кількістю тонких каналів (капілярів), активно вбирають у себе воду та інші рідини. Треба тільки, щоб рідини змочували поверхню тіла. Наприклад, рушник вбирає в себе воду, коли ним витирають руки; у ґноті лампи гас безперервно піднімається по капілярах угору, де і згорає. Звичайні цеглини — пористі тіла, вони добре вбирають вологу. Тому цегляні будинки у нижній частині ізолюють від вологи.

Завдяки численним капілярам у ґрунті вода піднімається вгору й інтенсивно випаровується. Наприклад, у літній ясний день з 1 га ґрунту випаровується більше, ніж 10 т води. Щоб зберегти вологу в ґрунті, потрібно зруйнувати капіляри, тобто розпушити ґрунт.

❓ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке явища змочування; незмочування? Чому вони виникають?
2. Які явища називаються капілярними?
3. За якою формулою визначається висота підняття рідини в капілярі?
4. Наведіть приклади проявів капілярних явищ.

§ 52 БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. КРИСТАЛІЧНІ Й АМОРФНІ ТІЛА

Більшість твердих тіл перебуває в кристалічному стані. На сьогодні термін «тверде тіло» прийнято вживати для тіл кристалічної будови. Аморфні (некристалічні) тіла, наприклад смоли, скло, бурштин (янтар) тощо, розглядають як переохолоджену рідину.

Сила поверхневого натягу \vec{F} урівноважує силу тяжіння $m\vec{g}$, яка діє на стовпчик рідини висотою h . Якщо об'єм рідини в капілярі $V = \pi r^2 h$, то модуль сили тяжіння буде дорівнювати: $mg = \rho g V = \rho g h \pi r^2$. Підставивши в рівняння $\vec{F} = m\vec{g}$ вирази $F = \sigma 2\pi r$ і $mg = \rho g V = \rho g h \pi r^2$ для модулів сил, отримуємо $\sigma 2\pi r = \rho g h \pi r^2$.

Звідси висота підняття змочувальної рідини в капілярі визначається так:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad (4.13)$$

де σ — коефіцієнт поверхневого натягу; ρ — густина рідини; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

Всі кристалічні тіла можна поділити на дві групи: **монокристали** і **полікристали**.

Кристалічну структуру мають метали. Якщо взяти кусок металу, то на перший погляд здається, що кристалічна будова металу не виявляється ні у зовнішньому вигляді, ні у його фізичних властивостях. Метали у звичайному стані не анізотропні.

Пояснюється це тим, що метал складається з великої кількості маленьких кристалів, які зрослися один з одним. Під мікроскопом або навіть за допомогою лупи їх можна побачити, особливо на свіжому зламі металу. Властивості кожного кристалика різні у різних напрямках, але орієнтовані кристалики один відносно одного хаотично. Внаслідок цього в об'ємі, що значно перевищує об'єм одного кристалика, усі напрями всередині металів рівноправні, а їхні властивості однакові в усіх напрямках.

Тверде тіло, яке складається з великої кількості маленьких кристаликів, називають полікристалічним. Поодинокі кристали називають монокристалами.

До полікристалів належать не тільки метали. Наприклад, кусок цукру також має полікристалічну структуру. Більшість кристалічних тіл — полікристали, оскільки вони складаються з великої кількості кристалів, що зрослися.

Поодинокі кристали — монокристали — мають правильну геометричну форму (мал. 195) і їхні властивості різні у різних напрямках. Великі монокристали порівняно рідко трапляються у природі (кристали гірського кришталю (кварцу), ісландського шпату, кухонної солі, алмазу тощо).

Основною особливістю полікристалів є те, що їх механічні, теплові, електричні, магнітні та інші властивості у різних напрямках однакові. На відміну від цього властивості монокристалів у різних напрямках різні.

Незалежність фізичних властивостей речовини від напрямку називається ізотропністю.

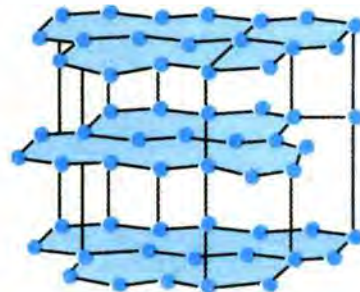
Залежність фізичних властивостей речовини від напрямку називається анізотропією.

Усі рідини, аморфні тіла, гази і полікристали є ізотропними речовинами: їх властивості в усіх напрямках однакові. Усі монокристали анізотропні: їх властивості у різних напрямках різні.

Залежність механічної міцності від напрямку яскраво виражена у багатьох кристалічних тіл. Наприклад, слюда легко розщеплюється на шари, але її досить важко поламати у напрямі, перпендикулярному до розшарування. Отже, кристали слюди мають неоднакову міцність у різних напрямках. Так само кристал графіту легко розшарувати тільки в одному напрямі. Це пояснюється тим, що кристалічна ґратка графіту має шарувату структуру (мал. 196), що не можна сказати про алмаз, який використовується практично в усіх оброблювальних інструментах (мал. 197).



Мал. 195



Мал. 196



Мал. 197

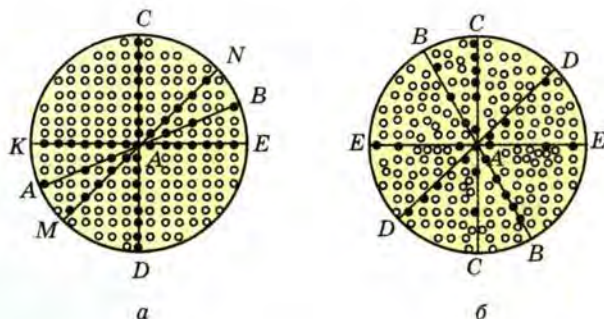
Два бруски з великого шматка льоду, вирізані у взаємно перпендикулярних напрямках, будуть деформуватися під дією зовнішньої сили неоднаково: один брусок прогнеться подібно до металевої лінійки, а другий — зруйнується як крихке скло. Таким чином, деформація кристалічних тіл у різних напрямках відбувається неоднаково.

Дивовижна анізотропія твердості спостерігається у кристалів мінералу каїніту: вздовж одних граней кристали каїніту легко дряпаються дерев'яною паличкою або просто нігтем, а на інших гранях навіть добре загострений ніж залишає ледве помітний слід.

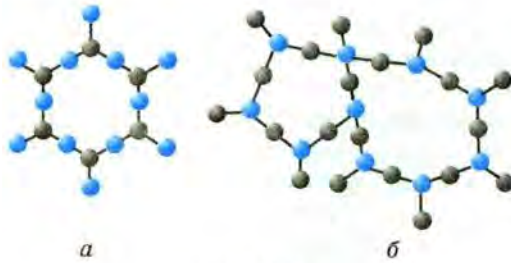
Неоднакові у різних напрямках також і теплові властивості кристалів (теплопровідність, теплове розширення і т. д.). Нанесемо на поверхню гіпсової і скляної пластинок тонкий шар парафіну і по черзі в їх центрі поставимо сильно розжарену голку. Теплова енергія від розжареної голки шляхом теплопровідності передаватиметься частинкам гіпсу і скла, і парафін поблизу точки дотику голки почне плавитися. При цьому на гіпсовій пластинці область розплавленого парафіну набуде форми еліпса, а на скляній пластинці — форми кола. Як відомо, гіпс має кристалічну будову, а скло — аморфне тіло. Описаний дослід показує, що теплова енергія в аморфних тілах в усіх напрямках поширюється однаково, а теплопровідність кристалів у різних напрямках різна.

Унаслідок строго впорядкованої внутрішньої будови кристалів у різних напрямках усередині кристала розташована неоднакова кількість частинок. Уздовж тих напрямків, де частинки кристала розташовані густіше (мал. 198, *a*, напрямки *CD*, *KE*), сили взаємодії між ними більші, і навпаки, у напрямках, де частинки розташовані рідше (*AB*, *MN*), сили взаємодії між ними менші. Отже, уздовж напрямків *CD* і *KE* міцність кристала вища, ніж уздовж напрямків *AB* і *MN*. З цієї причини механічні, теплові, електричні, магнітні й оптичні властивості кристалів різні у різних напрямках.

У рідинах, газах і аморфних тілах у будь-якому напрямі розташовується приблизно однакова кількість частинок речовини (мал. 198, *б*). Тому такі тіла мають ізотропні властивості.



Мал. 198



Мал. 199

Слід зазначити, що один і той самий кристал є ізотропним відносно одних властивостей і анізотропним відносно інших.

Так, кристали хлориду натрію (кухонної солі) і міді ізотропні відносно теплового розширення і теплопровідності, але анізотропні відносно механічних властивостей.

Проте не всі тверді тіла є кристалічними. Є багато аморфних (з грецької *морфе* — форма, частинка *a* означає заперечення) тіл. Чим вони відрізняються від кристалічних тіл?

Аморфні тіла — це тіла, які не мають точного порядку в розташуванні атомів.

Тільки найближчі атоми розташовуються у деякому порядку. Проте точного повторення в усіх напрямках одного й того самого елемента структури, характерного для кристалів, в аморфних тілах немає.

Часто одна й та сама речовина може перебувати і в кристалічному, і в аморфному стані. Наприклад, кварц (SiO_2) може бути у кристалічній і в аморфній формах (кремнезем). Кристалічну форму кварцу схематично зображають у вигляді ґратки з правильних шестикутників (мал. 199, *a*). Аморфна структура кварцу також має вигляд ґратки, але неправильної форми. Крім шестикутників, у ній бувають п'яти- і семикутники (мал. 199, *b*).

Усі аморфні тіла ізотропні, тобто їхні фізичні властивості однакові в усіх напрямках. До аморфних тіл належать скло, багато пластмас, смола, каніфоль, цукровий льодяник та ін.

Під зовнішнім впливом аморфні тіла виявляють одночасно пружні властивості, подібно до твердих тіл, і текучість, подібно до рідин. У разі короткочасної дії (удару) вони поведуться як тверде тіло і від сильного удару розколюються на шматки. Але в процесі тривалої дії аморфні тіла течуть. Так, шматок смоли поступово розтікається по твердій поверхні.

Атоми або молекули аморфних тіл, як і молекули рідини, мають певний час, так званий час осілого життя — час коливань біля положення рівноваги. Проте на відміну від рідин цей час у них досить великий. Наприклад, для смоли при $t = 20^\circ\text{C}$ час осілого життя становить 0,1 с. За цими властивостями аморфні тіла наближаються до кристалічних, оскільки перескоки атомів з одного положення рівноваги в інше відбуваються рідко.

При низьких температурах аморфні тіла за своїми властивостями нагадують тверді тіла. Текучість в них майже відсутня. Але з підвищенням температури вони поступово розм'якшуються і їхні властивості дедалі більше наближаються до властивостей рідин. Це пояснюється тим, що з підвищенням температури стають частішими перескоки атомів з одного положення рівноваги в інше.

Певної температури плавлення аморфні тіла не мають.

Проте, якщо раніше фізика твердого тіла не встигала за розвитком технології, що ґрунтується на безпосередньому досліді, то зараз теоретичні дослідження приводять до створення твердих тіл, властивості яких незвичайні, й добути їх методом спроб і помилок неможливо. Створення таких пристроїв, як транзистори, — яскравий приклад того, як розуміння структури твердих тіл привело до революції в усій радіотехніці.

Створення матеріалів із заданими механічними, магнітними, електричними та іншими властивостями — один з основних напрямів сучасної фізики твердого тіла. Приблизно половина фізиків світу працює нині в галузі фізики твердого тіла.

Аморфні тіла займають проміжне положення між кристалічними твердими тілами і рідинами. Їхні атоми або молекули розміщені у відносному порядку. Розуміння структури твердих тіл (кристалічних і аморфних) дає змогу створювати матеріали із заданими властивостями.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які тіла називаються монокристалічними? полікристалічними?
2. Що таке анізотропія? ізотропія?
3. Чи всі кристалічні тіла анізотропні?
4. Деревина анізотропна. Чи є вона кристалічним тілом?
5. Наведіть приклади монокристалічних і полікристалічних тіл, не згаданих у тексті.
6. Чим відрізняються аморфні тіла від кристалічних?
7. Наведіть приклади аморфних тіл.
8. Чи виникла б професія склодува, якби скло було кристалічним тілом, а не аморфним?

§ 53 ВИДИ ДЕФОРМАЦІЙ. ЗАКОН ГУКА

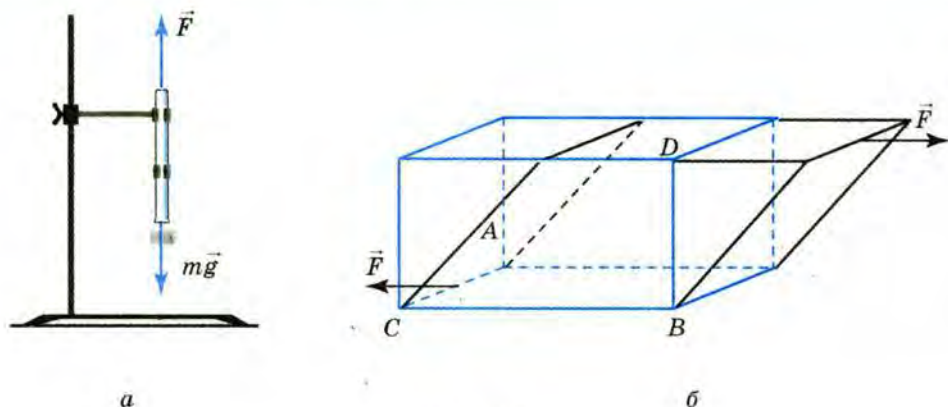
У природних умовах частинки кристала перебувають у стані рівноваги: сили притягання і відштовхування між ними однакові. Під дією зовнішніх сил частинки кристала зміщуються, внаслідок чого змінюються його форма і розміри, тобто виникає деформація. Злегка зігнемо сталеву пластинку — лінійку або полотно ножівки (пилки) — і потім відпустимо її. Пластинка випрямляється і набуває попередньої форми.

Деформація, яка повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил, називається **пружною деформацією**.

Властивість матеріалу відновлювати свою форму і розміри після припинення дії зовнішніх сил називають пружністю матеріалу. Якщо замінити сталеву пластинку свинцевою, то після припинення дії зовнішніх сил попередня форма пластинки не відновиться: деформація твердого тіла повністю не зникає.

Деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішніх сил, називається **пластичною деформацією**.

Властивість матеріалу зберігати придбану під дією зовнішніх сил форму називається **пластичністю**.



Мал. 200

Пружні деформації твердих тіл різноманітні. За характером дії зовнішніх сил всі деформації твердих тіл підрозділяють на чотири основні види: **розтяг (стиск), зсув, кручення і згин**.

Затиснемо в лапці штатива гумовий стержень, посередині якого щільно насаджена металева шайба (мал. 200, а). До нижнього кінця стержня підвісимо важок невеликої маси. На стержень, таким чином, будуть діяти протилежно напрямлені сили, значення яких будуть дорівнювати одне одному: сила тяжіння важка $m\vec{g}$ і сила пружності лапок штатива \vec{F} . Внаслідок цього стержень розтягується вздовж своєї осі — його довжина збільшується, а поперечні розміри скорочуються, і щільно надіта раніше на стержень шайба легко зісковзує вниз.

Збільшення довжини тіла (стержня) при дії на нього двох сил, що дорівнюють за модулем одна одній, але протилежних за напрямом, називається **деформацією розтягу**.

Деформацією розтягу випробовують різні троси, ланцюги, канати, струни музичних інструментів, багато груп м'язів при виконанні роботи або фізичних вправ і т. д.

Якщо сили, що діють на тіло, напрямлені вздовж однієї прямої назустріч одна одній, то довжина тіла зменшується, а його поперечні розміри збільшуються.

Зменшення довжини тіла під дією двох сил, що дорівнюють одна одній за значенням і напрямлені назустріч одна одній, називається **деформацією стиску**.

Деформації стиску зазнають стовбури дерев, ніжки столів і стільців, опорні колони житлових і промислових будівель, нижні кінцівки людини під час ходьби, зуби під час пережовування їжі тощо.

Деформація зсуву виникає під дією двох паралельних сил, напрямлених у протилежні боки (мал. 200, б). У цьому випадку паралельно розташовані шари тіла зміщуються один відносно одного.

Зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох паралельних, але протилежно напрямлених сил, називається **деформацією зсуву**.

Деформація зсуву виникає і в тому випадку, якщо тіло одночасно стискати і розтягати у двох взаємно перпендикулярних напрямках AB і CD



в



г

Мал. 200

стержня. Звідси випливає, що між двома найбільш деформованими шарами знаходиться такий шар, який не зазнає ні розтягання, ні стискання; його називають **нейтральним шаром**. Матеріал нейтрального шару ніяких деформацій практично не зазнає і, отже, ніяких навантажень не несе. Ця дуже важлива обставина широко використовується в техніці. Так, це дало змогу замінити широкі балки прямокутного перерізу, що піддаються згину, одновантажними (у вигляді літери Т) або двовантажними балками (мал. 201), а суцільні металеві стержні трубами, що дає велику економію матеріалів, істотно зменшує вагу машин та інших технічних конструкцій і зменшує їх вартість.

(мал. 200, б). Деформації зсуву піддаються болти, заклепки, а також всі тіла, які переміщуються одне відносно одного із значним тертям.

Візьмемо гумову трубку, в яку на рівних відстанях вставимо тонкі металеві стержні (мал. 200, в). Повертаючи руками вільні кінці трубки навколо її осі, помічаємо, що стержні при цьому зміщуються один паралельно одному, розташовуючись по гвинтовій лінії.

Поворот паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох сил називається **деформацією кручення**.

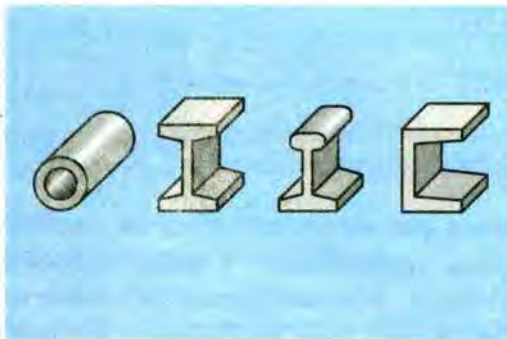
Деформації кручення зазнають вали двигунів при обертанні, гвинти і шурупи при загвинчуванні, циліндричні пружини динамометрів при розтяганні, окремі групи м'язів шиї і тулуба при повороті голови або всього тулуба.

Просунемо через товстий гумовий стержень на рівних відстанях тонкі металеві спиці і зігнемо його так, як показано на мал. 200, г.

Згинання (вигинання) тіла під дією сили, напрямленої перпендикулярно до його осі, називається **деформацією поперечного згину**.

З мал. 200, г видно, що верхня частина стержня розтягується (спиці розходяться віялоподібно), а нижня, навпаки, стискається (спиці сходяться), причому тим більше, чим ближче даний шар до краю

Механізм пружних деформацій полягає у наступному. Під дією зовнішніх сил відбувається зсув частинок твердого тіла відносно їх рівноважних положень. Наприклад, при розтяганні тіла відстані між сусідніми частинками кристала збільшуються, і сили притягання і відштовхування між ними зменшуються, але неоднаково, внаслідок чого сили притягання починають переважати над силами відштовхування. Тому при знятті зовнішнього навантаження частинки кристала повертаються у початковий рівноважний стан. Форма і розміри тіла відновлюються. При стисканні, навпаки, відстань між частинками кристала зменшується, сили притягання і відштовхування збільшуються. Але при цьому сили відштовхування збільшуються швидше, ніж сили притягання, і частинки кристала при знятті зовнішнього навантаження відштовхуються одна від одної і повертаються у початковий стан.



Мал. 201

При пластичній деформації під дією зовнішніх сил одночасно розривається кілька зв'язків між частинками й шари кристала починають ковзати один відносно одного (мал. 202, а, б). Це відбувається, доки частинки знов не опиняться в такому положенні, коли всередині кристала всі зв'язки знову відновляються (мал. 202, в). Таке положення частинок усередині кристала є рівноважним, як і первинне, і тому при знятті навантаження всередині кристала не виникає сил, які б повертали частинки у попереднє положення: форма і розміри твердого тіла не відновлюються.

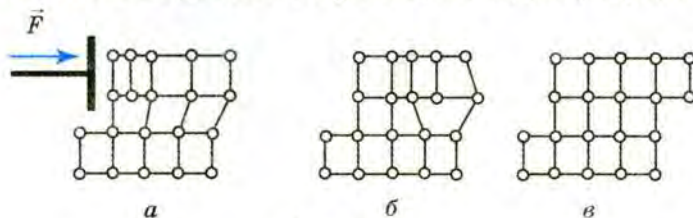
Якщо сили діють у напрямі поздовжньої осі тіла і напрямлені у протилежні боки назовні (мал. 203), то виникає деформація розтягу. Під час розтягу тіло видовжується у поздовжньому напрямі і скорочується у поперечному напрямі.

Якщо сили діють у напрямі поздовжньої осі тіла і напрямлені у протилежні боки назовні (мал. 203), то виникає деформація розтягу. Під час розтягу тіло видовжується у поздовжньому напрямі і скорочується у поперечному напрямі.

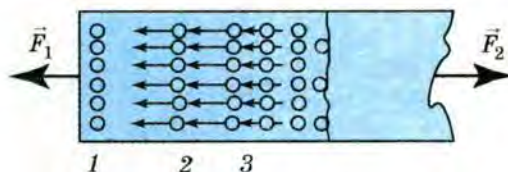
Якщо початкова довжина стержня l , а довжина після розтягу l_1 , то $\Delta l = l_1 - l$ називається **абсолютним видовженням**. Відношення абсолютного видовження до початкової довжини $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ називається **відносним видовженням**.

Відносна деформація показує значення абсолютної деформації, яка припадає на кожен одиницю початкової довжини тіла, що деформується.

Нехай стержень розтягується під дією двох сил F_1 і F_2 (мал. 203). Між частинками, з яких складається стержень, як відомо, одночасно діють і



Мал. 202



Мал. 203

сили притягання, і сили відштовхування. При розтяганні стержня відстань між частинками збільшується і сили притягання стають більшими за сили відштовхування. Тому шар 1, віддаляючись від шару 2, тягне його за собою; у свою чергу шар 2 тягне за собою шар 3, і таким чином дія зовнішніх сил F_1 і F_2 передається вздовж усього стержня. У середині деформованого стержня у кожному його перерізі виникають сили, що отримали назву **сил внутрішньої напруги**.

Величина, що вимірюється силою внутрішньої напруги, яка діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла, називається **механічною напругою**:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (4.14)$$

Механічну напругу характеризує розподіл сил внутрішньої напруги у деформованому тілі.

У СІ за одиницю механічної напруги береться така напруга всередині деформованого тіла, коли на площу 1 м^2 діє сила 1 ньютон ($\text{Н/м}^2 = \text{Па}$). Названа на честь Блеза Паскаля (1623—1662) — французького фізика, математика, філософа.

Механічна напруга пружно деформованого тіла залежить від матеріалу, з якого воно виготовлене, і значення відносної деформації. В однакових за розмірами тілах, але виготовлених з різних речовин, при одній і тій самій відносній деформації виникає різна механічна напруга.

Механічна напруга, що виникає в речовині при відносній деформації $\varepsilon = 1$, називається **модулем пружності k** .

Чим більший модуль пружності речовини k , тим більша механічна напруга виникає в ній: $\sigma \sim k$.

Досліди, проведені англійським ученим Робертом Гуком (1635—1703), показали, що механічна напруга тим більша, чим більше значення відносної деформації тіла: $\sigma \sim \varepsilon$.

Отже, механічна напруга пружно деформованого тіла прямо пропорційна відносній деформації і модулю пружності речовини, з якої воно виготовлене:

$$\sigma = k\varepsilon.$$

Це співвідношення носить назву **закону Гука**.

Для подовжнього стискання або розтягу модуль пружності k носить назву модуля Юнга (названий на честь Томаса Юнга (1773—1829) — англійського фізика, лікаря і астронома) і позначається літерою E . Тоді закон Гука набуває такого вигляду:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.15)$$

Враховуючи співвідношення $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ і $\sigma = E\varepsilon$, можна записати: $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$.

Якщо абсолютне видовження дорівнює початковій довжині $\Delta l = l_0$ (довжина тіла, що деформується, зростає удвічі), то з останнього співвідношення випливає, що $E = \sigma$.

Таким чином, модуль Юнга є такою механічною напругою, яка виникає в матеріалі при збільшенні початкової довжини тіла у 2 рази.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

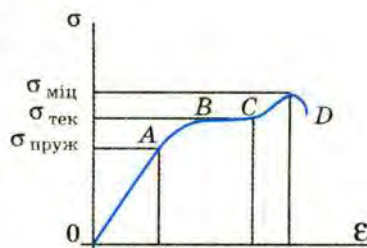
1. Від яких причин залежить деформація тіла?
2. Чим відрізняються пружні деформації від пластичних?
3. Яке значення має пружність і пластичність матеріалів для техніки?
4. У чому полягає закон Гука? З яких дослідних фактів він випливає?
5. Що характеризує модуль пружності матеріалу?
6. У чому полягає зміст твердження, що модуль пружності сталі у 2,5 раза більший за модуль пружності алюмінію?

§ 54 МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Закон Гука встановлює залежність між деформацією і механічною напругою аналітично. Але цю залежність можна виразити наочно у вигляді графіка, що отримав назву **діаграми розтягу**. Початкова ділянка кривої OA (мал. 204) є пряма лінія: механічна напруга тут прямо пропорційна відносній деформації. Це область пружних деформацій. Тільки в області пружних деформацій виконується закон Гука, і тверде тіло виявляє властивості пружності.

Найбільша механічна напруга, при якій деформації тіла залишаються пружними, називається **границею пружності** $\sigma_{пр}$.

Границі міцності і модуль пружності різних матеріалів наведені у табл. 6. Так, границя пружності для заліза становить 120 МПа, для сталі — 344 МПа. Якщо механічна напруга перевищить ці значення, то після припинення дії зовнішніх сил тіло вже не відновить свою попередню форму або розміри.



Мал. 204

Границі пружності і міцності деяких матеріалів під час розтягу (при $t = 20^\circ \text{C}$)

Таблиця 6

Матеріал	Границя пружності $\sigma_{\text{пруж}}$, МПа	Границя міцності $\sigma_{\text{міц}}$, МПа
Алюміній	30	130
Залізо	120	400
Сталь вуглецева	344	440—590
Магній	12	180
Дуб (вздовж волокон)	—	80
Лід (при 0°C)	—	4

Ділянку кривої $ABCD$ (мал. 204) характеризує область пластичних деформацій; тут між σ і ϵ немає лінійної (прямо пропорційної) залежності. На ділянці AB відносна деформація зростає швидше за механічну напругу і при деякому значенні $\sigma_{\text{тек}}$ виникає **явище текучості** твердих тіл: механічна напруга не змінюється, а деформація збільшується (ділянка кривої BC). Тверде тіло тече подібно до дуже в'язкої рідини.

Механічна напруга, при якій виникає явище текучості твердого тіла, називається границею текучості.

При досягненні границі текучості на стержні з'являється місцеве звуження — так звана шийка. Починаючи з цього моменту, деформації зазнає тільки шийка, а решта матеріалу стержня практично ніяких деформацій не зазнає. Тому навіть при незначному збільшенні напруги незабаром настає розрив. У момент, безпосередньо передуючий розриву, напруга в матеріалі досягає максимального значення $\sigma_{\text{міц}}$ — це **границя міцності**. Границя міцності залежить від характеру деформації і роду матеріалу (табл. 6).

При розрахунку конструкцій допустиму напругу вибирають так, щоб вона становила певну частку від границі міцності.

Число, яке показує, у скільки разів границя міцності більша за допустиму напругу, називається запасом міцності: $\chi = \frac{\sigma_{\text{м}}}{\sigma_{\text{д}}}$.

Зазвичай для сталі запас міцності вибирають від 2,5 до 4, для заліза від 4 до 5, для чавуну від 6 до 8, для дерева від 8 до 10. При виборі запасу міцності враховується характер випробовуваного навантаження (постійне, змінне, ударне тощо), тип споруди й економічність конструкції.

Границя міцності багатьох матеріалів (мідь, цинк, залізо, незагартована сталь) значно більша, ніж границя пружності. Такі матеріали мають достатньо широкі області пружних і пластичних деформацій. Вони отримали назву **в'язких матеріалів**.

Проте разом із цим існує й цілий ряд матеріалів (чавун, скло, мармур і т. д.), в яких границя міцності і границя пружності майже однакові. Такі матеріали називаються **крихкими**. У них область пластичних деформацій майже відсутня і руйнування настає без появи залишкових пластичних деформацій. Матеріали, в яких відсутня область пружних деформацій, називаються **пластичними** (віск, глина, пластилін та ін.).

Крім пружності і пластичності, в'язкості й крихкості, тверді тіла ще розрізняють і за твердістю.

Твердістю називається властивість тіла чинити опір проникненню в нього іншого тіла.

Проведемо вздовж скляної пластинки лінію спочатку гострою мідною голкою, а потім алмазом. Мідна голка ніякого сліду на скляній пластинці не залишить, а алмаз залишає на склі глибоку подряпину. Отже, скло твердіше за мідь, а алмаз твердіший за скло.

Для визначення твердості матеріалів зазвичай користуються десятибальною шкалою твердості. У цій шкалі твердість усіх мінералів порівнюється з твердістю десяти спеціально вибраних мінералів. Шкала твердості: тальк — 1, гіпс — 2, кальцит — 3, флюорит — 4, апатит — 5, ортоклаз — 6, кварц — 7, топаз — 8, корунд — 9, алмаз — 10. Твердість матеріалів необхідно знати при виготовленні різних різальних інструментів: ножів, ножиць, різців, свердел тощо.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як досліджують матеріал на розтяг? Як оцінюють значення навантаження і деформації зразка під час дослідження на розтяг?
2. З якою метою використовують діаграму розтягу матеріалу?
3. Як оцінюють пластичність матеріалів?
4. У чому відмінність крихких матеріалів від пластичних?
5. Чому розрахунок на міцність проводиться за допустимими напруженнями, а не за границею міцності?
6. Від яких причин залежить вибір запасу міцності?

§ 55 РІДКІ КРИСТАЛИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Рідкі кристали (РК) — речовини, що мають одночасно властивості як рідин (текучість), так і кристалів (анізотропія).

За структурою рідкі кристали (РК) є рідинами, схожими на желе, що складаються з молекул витягнутої форми, певним чином упорядкованих в усьому об'ємі цієї рідини. Найбільш характерною властивістю РК є їх здатність змінювати орієнтацію молекул під дією електричних полів, що відкриває широкі можливості для застосування їх у промисловості. За типом РК зазвичай поділяють на дві великі групи: **нематичні** і **сметичні**. У свою чергу нематичні поділяються на **нематичні** і **холестеричні** рідкі кристали.

Рідкі кристали у 1888 р. відкрив австрійський ботанік Ф. Рейнітцер. Він звернув увагу, що у кристалів холестерилбензоата і холестерилацетата дві точки плавлення і, відповідно, два різних рідких стани — каламутний і прозорий. Проте вчені не звернули особливої уваги на незвичайні властивості цих рідин. Довгий час фізики і хіміки не визнавали рідкі кристали, тому що їх існування руйнувало теорію про три стани речовини: твердий, рідкий і газоподібний. Учені відносили рідкі кристали то до колоїдних розчинів, то до емульсій. Наукове доведення існування рідких кристалів було зроблене професором Отто Леманном після багаторічних досліджень, але навіть після появи у 1904 р. написаної ним книги «Рідкі кристали» відкриттю не знайшлося застосування.

Найважливішою властивістю рідких кристалів є зміна кольору під впливом температури. Вона була використана американцем Дж. Фергюсоном у 1963 р. для виявлення невидимих простим оком теплових полів. Після того, як йому видали патент на винахід, інтерес до рідких кристалів різко зріс.

У 1965 р. у США зібралася Перша міжнародна конференція, присвячена рідким кристалам, а в 1968 р. учені створили принципово нові індикатори для систем відображення інформації. Принцип їх дії заснований на тому, що молекули рідких кристалів, обертаючись в електричному полі, по-різному відбивають і пропускають світло.

Та все ж тільки після 1973 р., коли група англійських хіміків під керівництвом Джорджа Грея синтезувала рідкі кристали з відносно дешевої і доступної сировини, ці речовини набули широкого застосування у різноманітних пристроях.

За своїми загальними властивостями рідкі кристали можна розподілити на дві великі групи:



Мал. 205



Мал. 206



1. Термотропні рідкі кристали, що утворюються внаслідок нагрівання твердої речовини й існують у певному інтервалі температур і тиску.

2. Ліотропні рідкі системи, які є дво- або багатокомпонентними, що утворюються в сумішах стержньоподібних молекул даної речовини і води (або інших полярних розчинників). Ці стержньоподібні молекули мають на одному кінці полярну групу, а велика частина стержня є гнучким гідрофобним вуглеводневим ланцюгом. Такі речовини називаються **амфіфілами**.

Амфіфільні молекули, як правило, погано розчиняються у воді, схильні утворювати агрегати таким чином, що їх полярні групи на межі розділу фаз напрямлені до рідкої фази. При низьких температурах змішування рідкого амфіфіла з водою приводить до розшарування системи на дві фази. Одним з варіантів амфіфілів зі складною структурою може слугувати система мило—вода.

Термотропні рідкі кристали поділяються на три великі класи:

1. Нематичні рідкі кристали (мал. 205). Вони поведуться подібно до звичайних рідин. Прикладом речовини, що створює нематичний рідкий кристал, може слугувати N-(пара-метоксибензиліден)-пара-бутиланілін.

2. Сметичні рідкі кристали (мал. 206). Вони мають шарувату структуру, шари можуть переміщуватися один відносно одного. Товщина сметичного шару визначається довжиною молекул (переважно довжиною парафінового «хвоста»), проте в'язкість сметиків значно вища, ніж у нематиків і густина по нормалі до поверхні шару може сильно змінюватися. Типовим є терефтал-біс(пара-бутиланілін).

3. Холестеричні рідкі кристали (мал. 207). Вони утворюються головним чином з'єднаннями холестерину та інших стероїдів. Це нематичні рідкі кристали, але їх довгі осі повернуті одна відносно одної так, що вони утворюють спіралі, дуже чутливі до зміни температури внаслідок надзвичайно малої енергії утворення цієї структури (порядку 0,01 Дж/моль). Як типовий холестерик можна назвати аміл-пара-(4-ціанобензиліденаміно)-цінамат.

Холестерики яскраво забарвлені і щонайменша зміна температури (до тисячних доль градуса) приводить до зміни кроку спіралі і відповідно зміни забарвлення рідкого кристала.



Мал. 207

У рідких кристалів незвичайні оптичні властивості. Нематики і сметики оптично одноосні кристали. Холестерики внаслідок періодичної будови сильно відбивають світло у видимій області спектра. Оскільки в нематиках і холестериках носіями властивостей є рідка фаза, вона легко деформується під впливом зовнішньої дії,

а оскільки крок спіралі в холестериках дуже чутливий до температури, то і відбивання світла різко змінюється з температурою, спричинюючи зміну кольору речовини.

Тому одним із важливих напрямів використання рідких кристалів є термографія. Добираючи склад рідкокристалічної речовини, створюють індикатори для різних діапазонів температури і для різних конструкцій. Наприклад, рідкі кристали у вигляді плівки наносять на інтегральні схеми і плати електронних схем. Несправні елементи (гарячі або холодні), що не працюють, відразу помітні завдяки яскравим кольоровим плямам. Нові можливості дістали лікарі: рідкокристалічний індикатор на шкірі хворого швидко діагностує приховане запалення і навіть пухлину.

За допомогою рідких кристалів виявляють пару шкідливих хімічних сполук і небезпечно для здоров'я людини ультрафіолетове випромінювання. На основі рідких кристалів створені детектори ультразвуку. Проте найбільш застосовувана область рідкокристалічних речовин — інформаційна техніка. Від перших індикаторів, які всі бачили на електронному годиннику (мал. 208), до кольорових телевізорів з рідкокристалічним екраном розміром з поштову листівку пройшло лише декілька років. Такі телевізори дають зображення дуже високої якості, споживаючи мінімальну енергію.



Мал. 208

❓ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке рідкі кристали?
2. Які є види рідких кристалів? Як вони називаються?
3. Назвіть характерні властивості рідких кристалів.
4. Де застосовуються рідкі кристали?

§ 56 ПОЛІМЕРИ: ЇХ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Розглянемо, що є головною складовою полімера, яка визначає його основні властивості, а саме — сполучною основою (речовиною). У текстоліті сполучною речовиною є фенолформальдегідна смола, в ебоніті — каучук, у целулоїді — нітроцелюлоза тощо.

Основна відмінність полімерів від інших речовин полягає в тому, що вони складаються з гігантських молекул, утворених шляхом сполучення великої кількості однакових малих молекул. У молекули полімерів входять зазвичай десятки і сотні тисяч міцно зв'язаних між собою атомів. Частіше всього вони становлять дуже довгі, химерно вигнуті гнучкі ланцюги, лінійні або розгалужені (мал. 209). Довжина таких ланцюгових молекул може досягати 0,001 мм, а поперечні розміри мають порядок 10^{-10} м.

Полімери — сполуки з високою молярною масою, молекули яких складаються з великої кількості ланцюжків одного або кількох типів, що регулярно або нерегулярно повторюються.

Будь-який полімер можна порівняти з клубком переплетених між собою ниток. Молекули полімеру перебувають у постійному тепловому русі, тому нитки у клубку



Мал. 209

слід уявляти собі як такі, що постійно «ворушаться». Отже, властивості полімерів можна пояснити двома особливостями їх будови: 1) великою довжиною і гнучкістю ланцюгових молекул; 2) великою силою взаємодії між групами атомів уздовж ланцюга порівняно із силами взаємодії між молекулами.

Для розгляду властивостей твердого тіла виділимо два типи полімерів: каучуки і пластмаси. Особливістю каучуків є еластичність. Для пластмас характерна зміна їх пластичності при зміні температури.

Якщо багатоатомні ланцюгові молекули здатні легко витягуватися, то полімери являють собою каучуки. Каучук надає гумі еластичності, тобто здатності витримувати без руйнування пружні деформації порядку 100 %. Під дією зовнішніх сил довгі, гнучкі, переплетені між собою молекули каучуку частково випрямляються, що викликає їх значне видовження. Після припинення дії зовнішніх сил молекули під впливом теплового руху знову вигинаються і скорочуються.

Еластичність каучуку пояснюється тим, що великі пружні деформації у ньому не пов'язані зі зміною середніх відстаней між частинками і переміщенням самих молекул. Вони визначаються лише зміною форми гнучких молекул каучуку.

Пружні властивості каучуку зберігаються у широкому діапазоні температур. Однак при низьких температурах рухливість молекул зменшується і гума стає ламкою. На сьогодні створені морозостійкі каучуки.

Пластичні маси (пластмаси) — різновид полімерів, головною складовою частиною яких у більшості випадків є синтетичні смоли. Вони за звичайних умов є твердими тілами, які мають значну міцність і пружність форми.

Ниткоподібні молекули смоли тісно переплітаються одна з одною і мають багато точок дотику, між якими діють значні сили взаємного притягання. Чим довші молекули, тим більше точок дотику між ними. Це є причиною значної міцності і достатньої пружності більшості пластмас.

Під час нагрівання сили притягання між молекулами трохи послаблюються, рухливість молекулярних ланцюгів у пластмасах зростає, вони отримують можливість ковзати одна відносно одної. Пластмаса при цьому м'якне і стає пластичною. Цю властивість використовують під час виготовлення деталей штамповкою, пресуванням і литтям.

Ви вже знаєте, що головна складова частина полімера, яка визначає в основному його властивості, — це синтетичні смоли. Шляхом підбору смол різного хімічного складу отримують полімери з найрізноманітнішими властивостями. Наприклад, значно поширений у техніці й побуті матеріал, що має низку чудових властивостей — органічне скло (плексиглас). Його отримують на основі поліметилакрилата — смоли, яку одержують із метилового ефіру метакрилової кислоти. Ця смола є аморфною речовиною з однорідною внутрішньою будовою, тому органічне скло цілком прозоре. Непрозорим або кольоровим його можуть зробити різні наповнювачі або барвники.

Органічне скло за своїми властивостями відрізняється від звичайного (силікатного) скла: воно прозоре для ультрафіолетових променів і не крихке. Завдяки тому, що органічне скло складається з великих ланцюгових молекул, окремі ланки яких рухливі, воно перед руйнуванням може видовжуватися на 5—6 %. Звичайне скло видовжується лише на десятки частки відсотків. Під час механічного руйнування оргскла не буває скалок.

Воно дуже стійке до дії мастил, води, бензину і лугів, має хороші електроізоляційні властивості і при нагріванні до 50—70 °С легко розрізається, свердлиться, надійно склеюється і зварюється під тиском при температурі 200—250 °С.

Карболіт — дуже поширена пластмаса, її отримують гарячим пресуванням бакелітової смоли. Змішування смол-бакелітів із кварцевою або слюдяною мукою дозволяє виготовляти вироби з високими електроізоляційними властивостями. Для теплостійких пластмас як наповнювач використовують азбест. Кислотостійкий азбест підвищує хімічну стійкість пластмаси.

Бронзові вкладки підшипників на прокатних станах виходять з ладу через декілька днів, а вкладки з текстоліту слугують декілька місяців. Тефлон стійкий до дії багатьох хімічних речовин, а в деяких випадках є кращим за платину. Заміна натурального каучуку поліуретановим продовжує пробіг шин більше ніж у 2 рази. Пружини з полімерів, армовані склом, не поступаються у міцності сталевим, але мають перевагу над ними у легкості. Такі пружини не намагнічуються і не ржавіють. Міцність фенопластів майже дорівнює міцності заліза, а їх густина у 2 рази менша, ніж алюмінію. Органічне скло (плексиглас) поєднує в собі прозорість скла і міцність металу. Канат з капрону трохи поступається в міцності сталевому, однак не потопає у воді і не піддається корозії. Шестірні з капрону не створюють шуму. Підшипники з фторопласту не потребують змащування. Пінопласти (штучно отримують шляхом нагрівання смоли, насиченої газом) — пористі матеріали, які є хорошими тепло- і звукоізоляторами. Їх використовують у будівництві, на транспорті, у побуті тощо.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які речовини називаються полімерами?
2. Які типи полімерів ви знаєте?
3. У чому полягають основні властивості полімерів?
4. Назвіть відомі вам приклади застосування полімерів у техніці й побуті.

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Кубик масою 0,02 кг, який змочується водою, плаває на поверхні води. Довжина ребра кубика 0,03 м. На якій відстані від поверхні води знаходиться нижня грань кубика?

Розв'язання.

Архімедова сила $\vec{F}_A = \rho \vec{g} V = \rho \vec{g} a^2 x$, що діє на кубик і напрямлена вгору, зрівноважує силу тяжіння $m\vec{g}$, що діє на кубик, та силу поверхневого натягу $\vec{F} = \sigma l = 4a\sigma$, яка напрямлена вниз.

Отже, для проекцій сил на вісь Ox , напрямлену вгору, маємо

$$a^2 x \rho g - mg - 4a\sigma = 0.$$

Звідси

$$x = \frac{mg + 4a\sigma}{a^2 \rho g}.$$

Підставивши значення відомих величин, отримаємо

$$x = \frac{0,02 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 + 4 \cdot 0,03 \text{ м} \cdot 0,0728 \text{ Н/м}}{0,03 \text{ м} \cdot 0,03 \text{ м} \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} \approx 0,023 \text{ м.}$$

Сили поверхневого натягу вносять поправку близько 1 мм.

В і д п о в і д ь: $x \approx 0,023 \text{ м}$.

2. На дротині діаметром 0,7 мм і довжиною 1 м висів тягар масою 33 кг. Потім тягар відвели вбік до горизонтального положення дротини і відпустили. Чи витримає дротина коливання цього тягара, якщо границя міцності дротини $4 \cdot 10^8 \text{ Па}$?

Р о з в' я з а н н я.

Під час руху тягара по дузі кола радіусом l на тягар діють дві сили: сила тяжіння mg і сила натягу дротини \vec{F}_n . За другим законом динаміки

$$F_n - mg = \frac{mv^2}{l}. \text{ Звідки} \quad F_n = m \left(g + \frac{v^2}{l} \right).$$

Швидкість тягара в найнижчій точці траєкторії знайдемо із закону збереження енергії. Відведений до горизонтального положення тягар мав потенціальну енергію mgl , яка в найнижчій точці траєкторії перетворилася в кінетичну енергію тягарця $\frac{mv^2}{2}$, тобто $mgl = \frac{mv^2}{2}$, звідки $v^2 = 2gl$.

Тоді $F_n = m(g + 2g) = 3mg$.

Ця сила створює в дротині напругу $\sigma = \frac{F_n}{S} = \frac{3mg}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{12mg}{\pi d^2}$; $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Ця напруга значно перевищує границю міцності матеріалу дротини, отже, дротина не витримає навантаження і обірветься раніше, ніж тягар встигне дійти до нижнього положення.

В і д п о в і д ь: $\sigma = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Рівень А

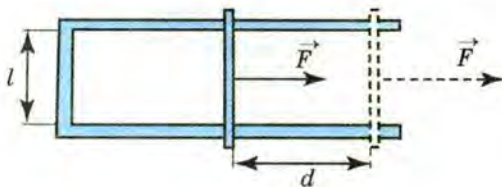
328. Під час випаровування з поверхні рідини вилітають молекули, які мають найбільшу швидкість. Тому можна припустити, що пара має вищу температуру, ніж рідина. Чому це не так?
329. В енергію яких видів перетворюється кінетична енергія молекули, що випаровується з рідини?
330. Вода перебуває в динамічній рівновазі зі своєю парою. За 1 с з 1 м^2 випаровується $6 \cdot 10^{25}$ молекул. Яка маса води щосекунди повертається в рідину через 1 м^2 поверхні?
331. При якому тиску вода кипітиме при температурі 19°C ?
332. У відкритій колбі вода закипає при температурі 100°C . Обчисліть атмосферний тиск. Густина пари при 100°C дорівнює $0,6 \text{ кг/м}^3$.
333. Чому пітніють окуляри, коли людина з морозу заходить до кімнати?
334. Що легше (за інших однакових умов): 1 м^3 сухого чи 1 м^3 вологого повітря?
335. Через трубку з речовиною, що вбирає вологу, пропустили 10 л повітря. Внаслідок цього маса трубки збільшилася на 300 мг. Визначте абсолютну вологість повітря.

336. Виміряти об'єм класного приміщення. Скільки кілограмів води міститься в повітрі у вигляді пари при даній температурі, якщо пара насичена?
337. У 4 м^3 повітря при температурі $16 \text{ }^\circ\text{C}$ міститься 40 г водяної пари. Визначте відносну вологість.
338. Покази сухого термометра в психрометрі $16 \text{ }^\circ\text{C}$, вологого — $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначте відносну вологість повітря.
339. Вода легша від піску. Чому ж вітер може підняти хмари піску, але підіймає дуже мало водяних бризок?
340. На поверхню води покладіть два сірники і шматком мила торкніться води між ними. Повторіть дослід, торкнувшись шматком цукру. Результати досліду поясніть.
341. На яку висоту підніметься вода у капілярі діаметром 1 мм ?
342. На яку висоту підніметься вода у ґрунті внаслідок його пористості, якщо діаметр ґрунтових капілярів $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, а вода повністю змочує ґрунт?
343. У капілярній трубці, радіус якої $0,5 \text{ мм}$, рідина піднялася на висоту 11 мм . Визначте густину цієї рідини, якщо коефіцієнт поверхневого натягу становить $0,022 \text{ Н/м}$.
344. Яку роботу треба виконати, щоб надути мильну бульбашку радіусом 4 см ? Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину дорівнює 40 мН/м .
345. Чому волейбольна сітка дуже натягується після дощу?
346. Чому крапля спирту розтікається по склу, а крапля ртуті набирає форму кулі?
347. Що спільного між процесами кипіння та випаровування і чим вони розрізняються?
348. Твердість матеріалу можна встановити двома способами: вдавлюванням у нього сталеві кульки і нанесенням подряпини. Який із способів характеризує пластичність, а який — крихкість?
349. Чому при недбалому поводженні із зошитом кутики аркушів загинаються і їм неможливо надати початкової форми?
350. Якої деформації зазнає пружне тіло, занурене в рідину?
351. Чому дорівнює абсолютне видовження сталю стержня завдовжки 5 м і площею поперечного перерізу $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ під дією вантажу вагою $1,96 \text{ кН}$?
352. Яку силу треба прикласти до сталю доту завдовжки $3,6 \text{ м}$ і площею поперечного перерізу 10^{-6} м^2 , щоб видовжити його на 2 мм ?
353. Під дією якої сили, спрямованої вздовж осі стержня, у ньому виникає напруга $1,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$? Діаметр стержня $0,4 \text{ см}$.
354. Дротина завдовжки $5,4 \text{ м}$ під дією вантажу видовжилась на $2,7 \text{ мм}$. Визначте абсолютне та відносне видовження дротини.

Рівень В

355. У циліндрі під поршнем міститься насичена водяна пара без повітря. Чи «пружинитиме» ця пара під час стиснення? Накресліть графік залежності тиску такої пари від об'єму.

356. Чи однаковий тиск має водяна пара у закритій посудині (з невеликою кількістю води) і в атмосфері під час туману, якщо посудина довго стоїть надворі?
357. Водяну пару, що має температуру $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиск 15 мм рт. ст. , без зміни об'єму охолоджують до $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Який тиск має пара при цій температурі? Якою стане ця пара?
358. Пара має температуру $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиск 10 мм рт. ст. Що це за пара? Якою стане пара, коли її об'єм зменшиться від 2 до $0,5\text{ л}$, а температура знизиться до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$?
359. З колби, в якій є небагато води, насосом відкачують повітря. Швидко чи повільно треба відкачувати, щоб вода закипіла? Замерзла? Чому?
360. Густина насиченої пари ртуті при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $0,02\text{ г/м}^3$. Визначте тиск пари при цій температурі.
361. Чому за літаком, що летить на великій висоті, утворюється слід?
362. Температура повітря $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, точка роси $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Яка абсолютна і відносна вологість повітря?
363. При температурі $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ повітря має відносну вологість 70% . Скільки води додатково випарується в 1 м^3 такого повітря?
364. При температурі $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносна вологість повітря в кімнаті дорівнює 80% . Який тиск водяної пари?
365. Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води використали піпетку, діаметр вихідного отвору якої 2 мм . Маса 40 крапель, як виявилось, дорівнює $1,9\text{ г}$. Чому дорівнює, за цими даними, коефіцієнт поверхневого натягу води?
366. Яку роботу потрібно виконати, щоб розтягнути на відстань $d = 10\text{ см}$ мильну плівку на дротяній рамці з рухомою перекладиною завдовжки $l = 5\text{ см}$ (мал. 210).
367. У носик скляної трубки з піпетки потрапляє крапля води (мал. 211). У який бік при цьому зрушить крапля: до широкого чи до вузького кінця трубки? Чому?
368. Крапля води витікає з вертикальної скляної трубки діаметром 1 мм . Визначити вагу краплі, якщо температура води $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
369. У дні чайника зроблено круглий отвір діаметром $0,1\text{ мм}$. До якої висоти у чайник можна налити воду, щоб вона не виливалась крізь отвір? Чи зміниться ця висота, якщо воду в чайнику підігріти?
370. Висота піднімання води по стеблу рису в 15 раз більша, ніж у ґрунті. Визначте діаметр капіляра стебла рису, якщо діаметр капіляра ґрунту $0,3\text{ мм}$.
371. У двох капілярних трубках різного діаметра, занурених у воду, встановилася різниця рівнів $2,6\text{ см}$. Коли ці самі трубки занурили в



Мал. 210



Мал. 211

- спирт, то різниця рівнів становила 1 см. Знаючи коефіцієнт поверхневого натягу води, визначте коефіцієнт поверхневого натягу спирту.
372. Який запас міцності забезпечено причіпному пристрою тепловоза, якщо його переріз 100 см^2 , границя міцності 500 МПа , а сила тяги тепловоза 75 кН ?
373. Стіну якої висоти можна вимурувати з цегли, якщо запас міцності дорівнює 6 ? Границя міцності цегли становить $6 \cdot 10^6 \text{ Па}$, густина — $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
374. До нижнього кінця вертикального дроту завдовжки 5 м і площею поперечного перерізу 2 мм^2 підвісили вантаж масою $5,1 \text{ кг}$, унаслідок чого дріт видовжився на $0,6 \text{ мм}$. Визначте модуль Юнга для матеріалу дроту.
375. Дріт завдовжки 3 м і діаметром $0,8 \text{ мм}$ висить вертикально. До вільного кінця дроту підвісили вантаж масою 5 кг . Довжина дроту збільшилася на $0,6 \text{ мм}$. Визначте напругу, відносне видовження дроту і модуль пружності.



Історична довідка

Вивчення капілярних явищ. З капілярними явищами, відомими ще з давнини, ми стикаємося щодня. Використання рушників, серветок, марлі, промокального паперу тощо можливе лише завдяки наявності в них капілярів. Проте капілярними ці явища почали називати лише в середині XVIII ст., термін «капіляр» підкреслює, що вода піднімається самовільно лише у тонких трубках.

Про капілярні явища вперше сповістив арабський учений аль-Хазіні у праці «Про терези мудрості». Європейські ж учені зацікавились капілярним підняттям лише в середині XVII ст., коли почали інтенсивно досліджувати атмосферний тиск та стиснення газів. Зокрема, **Е. Торрічеллі** відкрив існування атмосферного тиску і подав ідею Вавіані використати барометричну трубку — вертикальну скляну трубку з ртуттю або водою для вимірювання тиску. У 1660 р. Р. Бойль, керівник лабораторії фізики і хімії в Оксфорді, помітив, що висота, на яку піднімається вода, залежить від діаметра трубки, а також, що рівень ртуті у вузьких скляних трубках нижчий, ніж у широких, для води ж — навпаки. Ці ефекти були абсолютно незрозумілими, і Р. Бойль запропонував молодому асистенту Р. Гуку дослідити ці явища.

В основу своїх міркувань Р. Гук, спираючись на корпускулярну теорію Р. Бойля, поклав той факт, що разом із силами притягання між частинками різних речовин можуть діяти і сили відштовхування. Він спробував довести, що при контакті вода—скло сили притягання між частинками більші, ніж при контакті скло—повітря, тому вода витісняє повітря зі скляної трубки та піднімається вгору. Навпаки, у випадку контакту скло—ртуть діють потужніші сили відштовхування, ніж при контакті скло—повітря, тому повітря й виштовхує ртуть із капілярної трубки та змушує ртуть опускатись.

Лише 1718 р. англійський медик **Ж. Жюрен** провів експериментальні дослідження і чітко констатував, що висота рідини у капілярі обернено пропорційна до його діаметра, тобто довів, що добуток висоти на діаметр — величина стала, її було названо **капілярною сталою рідини**. Ж. Жюрен, як і Р. Гук, вважав, що рідина у капілярі піднімається внаслідок притягання частинок рідини частинками скла, та доповнив це припущення важливим висновком: сили притягання діють на досить малих відстанях.

Дослідження Ж. Жюрена дали поштовх для пошуків теоретичного обґрунтування встановленого кількісного закону. Французький математик **А. Клеро** у 1751 р. за-

пропонував першу кількісну теорію капілярних явищ. Він звернув увагу на те, що поверхня рідини у капілярах викривлена, причому при контакті вода—скло вона вгнута, а при контакті скло—ртуть — опукла. Для пояснення цих явищ А. Клеро сформулював гіпотезу Р. Гука про притягання різномірних частинок на межі рідини—повітря та додатково ввів поняття сили взаємного притягання частинок самої рідини.

Отже, А. Клеро зробив висновок: якщо переважає перша сила, то поверхня рідини вгинається у бік рідини, якщо ж взаємне притягання частинок рідини більше, ніж частинок на межі рідини—газ, то утворюється опуклий **меніск**.

А. Клеро спробував вивести рівняння, що визначає висоту підняття рідини в капілярі залежно від діаметра капіляра. Добре знаючи астрономію, він керувався відомим законом всесвітнього тяжіння і вважав, що притягання між частинками досить значне і діє на більших відстанях порівняно з розмірами самих частинок. Однак гіпотеза була хибною, тому й основні його розрахунки суперечили закону Ж. Жюрена.

У 1752 р. угорський інженер **Я. Сегнер** (1704—1777) винайшов оригінальний гідравлічний двигун, і до сьогодні його модель використовується для демонстрації реактивних сил. Я. Сегнер звернув увагу, що струмінь води, який вилітає із сопла двигуна, має певну форму. Це здалось йому дивним, оскільки форму зберігають лише тверді тіла. Я. Сегнер припустив, що поверхневий шар рідини схожий на еластичну плівку, яка утримує рідину і зберігає форму струменя. Цю властивість рідини було названо поверхневим натягом. Він не допустив помилок А. Клеро і правильно вважав, що притягання між частинками діє на дуже малих відстанях, тому й сили поверхневого натягу діють у дуже малому шарі.

На початку XIX ст. гіпотезу Я. Сегнера підтримав французький вчений **П. Лаплас** (1749—1827), який відкрив, що викривлена поверхня рідини створює додатковий тиск. Саме йому належить сучасне правильне доведення надлишку та недостатці тиску, що створюється опуклою чи вгнутою поверхнею рідини. Він вперше назвав цей тиск капілярним. Довівши, що значення капілярного тиску тим більше, чим сильніше викривлена поверхня та чим більша сила притягання, П. Лаплас вивів відоме для сферичної поверхні рідини рівняння:
$$p_R = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Окрім цього, П. Лаплас проаналізував, що капілярний тиск урівноважується гідростатичним, який створює стовпчик рідини. Оскільки гідростатичний тиск пропорційний висоті підняття рідини, а остання змінюється обернено пропорційно до діаметра трубки, то все це свідчить, що П. Лаплас дав вичерпну теоретичну відповідь на емпіричний закон Ж. Жюрена.

Згідно із законом П. Лапласа, якщо крапля рідини має форму кулі, то тиск усередині кулі сталий. Уперше цей висновок перевірів бельгійський фізик **Ж. Плато**. Він створив штучну невагомість, помістивши краплю аніліну у водний розчин кухонної солі. Оскільки густини рідин однакові, крапля аніліну зависала в ньому та набувала форми кулі.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється насичена пара від ненасиченої?
2. Як впливає вологість на життєдіяльність людини?
3. Яка причина виникнення сил поверхневого натягу?
4. Яку роль відіграє змочування в техніці?
5. Чим цікаві капілярні явища?

6. Які риси подібності й відмінності у властивостях полікристалічних і аморфних тіл?
7. Чим відрізняються за своєю будовою кусок цукру-рафінаду і крупинки цукрового піску?
8. Чим можна пояснити різницю у властивостях кристалічних і аморфних тіл?
9. Розкажіть, що ви знаєте про рідкі кристали.
10. Де застосовуються рідкі кристали?
11. Чому в техніці широко використовують полімери?
12. Які особливості будови молекул зв'язуючої основи полімерів?

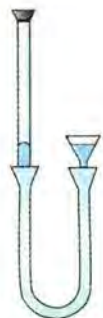
Що я знаю і вмю робити

Я вмю проводити експеримент і пояснювати його

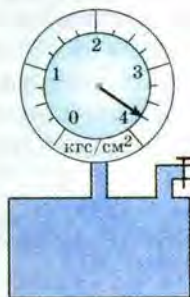
1. Використайте прилад, зображений на мал. 212. При двох різних положеннях лійки виміряйте об'єм повітря у трубці (в умовних одиницях) і виразіть його тиск у міліметрах ртутного стовпчика. За цими даними визначте атмосферний тиск.
2. Під час виконання лабораторної роботи на вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини $\sigma = \frac{mg}{\pi nd}$ (методом крапель) отримано такі результати: $m = 8,35 \pm 0,02$ г, $n = 100$, $d = 0,35 \pm 0,02$ см. Визначте σ .

Я вмю розв'язувати задачі на газові закони

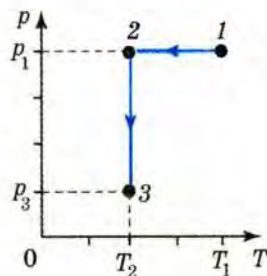
3. Тиск кисню в балоні, об'єм якого 20 л, вимірюється при 10 °С манометром, наведеним на мал. 213. Визначте масу цього кисню.
4. У камері автомобільної шини при температурі 20 °С тиск повітря дорівнює $6 \cdot 10^5$ Па. Яка густина повітря в камері?
5. У балоні місткістю 6 л знаходиться газ масою 0,1 кг під тиском 10 МПа при температурі 17 °С. Визначте молярну масу газу. Який це газ?
6. На скільки градусів треба ізобарно нагріти газ, взятий при температурі 17 °С, щоб його об'єм збільшився від 50 до 60 см³?
7. При якій температурі перебував газ у закритій посудині, якщо в результаті нагрівання його на 140 К тиск збільшився у 1,5 раза?
8. Одна з двох однакових колб наповнена киснем, а друга — азотом. У манометрах, з'єднаних із колбами, різниці рівнів рідини однакові. Як зміняться покази манометрів після занурення колб у посудину з підігрітою водою?



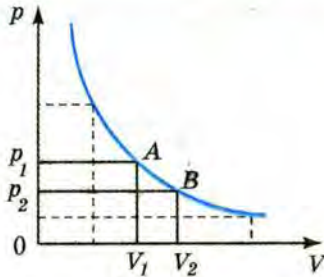
Мал. 212



Мал. 213



Мал. 214



Мал. 215

Я знаю, як аналізувати графіки, і вмю їх будувати

9. На мал. 214 наведено графік зміни стану ідеального газу в координатах pT . Якому процесу відповідає кожна ділянка графіка? Чому? Чому дорівнюватиме об'єм газу в стані 3, якщо в стані 1 він дорівнював 2 л?

10. На мал. 215 подано графік ізотермічного процесу. Що можна сказати про площі прямокутників Op_1AV_1 і Op_2BV_2 ?

11. Газ, що займав об'єм 10 л при тиску $0,5 \cdot 10^5$ Па, стиснули ізотермічно до об'єму 2 л, а потім ізохорно збільшили його температуру в 2 рази (за абсолютною шкалою температур). Чому дорівнюватиме тиск газу? Зобразіть процеси графічно в координатах pV .

Я знаю, як визначити кількість молекул газу

12. Визначте кількість молекул у 88 г вуглекислого газу.

13. Чи змінюється кількість молекул газу в одиниці об'єму при ізобарному процесі? Поясніть.

Я вмю застосовувати основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії

14. Визначте середню кінетичну енергію поступального руху молекул Оксигену, якщо його температура 27°C .

15. Яка середня квадратична швидкість молекул Гелію при температурі $0,1\text{ K}$? Яка середня квадратична швидкість атомів Гелію в атмосфері Сонця, де температура становить 6000 K ?

16. Який тиск чинить водень на стінки посудини при середній квадратичній швидкості руху його молекул 1 км/с , якщо концентрація молекул дорівнює $1,0 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$?

17. Визначте концентрацію молекул Оксигену, якщо його тиск дорівнює $0,2\text{ МПа}$, а середня квадратична швидкість молекул становить 700 м/с .

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант 1

1. Маса газоподібного Гідрогену в посудині дорівнює 2 г. Скільки молекул Гідрогену знаходиться в посудині?

А. 10^{23} . Б. $2 \cdot 10^{23}$. В. $6 \cdot 10^{23}$. Г. $12 \cdot 10^{23}$. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

2. Які фізичні параметри у двох тіл обов'язково повинні бути різними для того, щоб ці тіла не знаходилися між собою в тепловій рівновазі?

А. Температура, тиск і середня квадратична швидкість руху молекул.

Б. Температура і середня квадратична швидкість руху молекул.

В. Середня квадратична швидкість руху молекул.

Г. Тиск.

Д. Температура.

3. Яка з наведених нижче формул є основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу?

А. $v = \frac{N}{N_A}$. Б. $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. В. $p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$. Г. $\frac{pV}{N} = kT$. Д. $pV = \frac{m}{\mu} RT$.

4. Як зміниться тиск ідеального газу при збільшенні концентрації його молекул у 3 рази, якщо середня квадратична швидкість руху молекул залишається незмінною?

- А. Збільшиться в 2 рази.
- Б. Збільшиться в 3 рази.
- В. Не зміниться.
- Г. Зменшиться в 3 рази.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

5. Як зміниться середня квадратична енергія теплового руху молекул ідеального газу при збільшенні абсолютної температури газу в 3 рази?

- А. Збільшиться в 3 рази.
- Б. Збільшиться в 2 рази.
- В. Збільшиться в 4,5 рази.
- Г. Збільшиться в 9 разів.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

6. У першій посудині знаходиться азот, у другій — водень. Чому дорівнює відношення тиску p_1 азоту до тиску p_2 водню при однакових значеннях концентрації молекул і температури?

- А. 1. Б. 14. В. 1/14. Г. Відношення p_1 / p_2 може мати різні значення.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

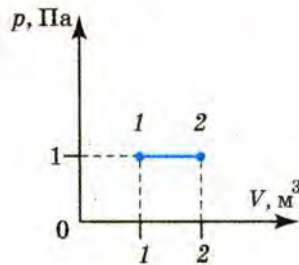
7. Яке значення температури по шкалі Цельсія відповідає температурі 200 °К за абсолютною шкалою?

- А. -473 °С. Б. -73 °С. В. +73 °С. Г. +473 °С. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

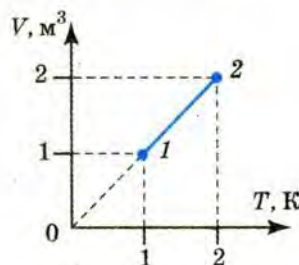
8. Як зміниться тиск ідеального газу при збільшенні його об'єму в 2 рази і зменшенні абсолютної температури в 2 рази?

- А. Зменшиться в 2 рази.
- Б. Зменшиться в 4 рази.
- В. Не зміниться.
- Г. Збільшиться в 2 рази.
- Д. Збільшиться в 4 рази.

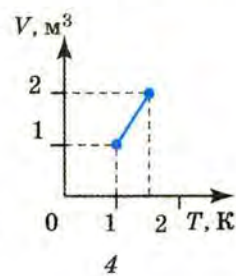
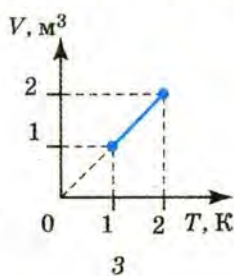
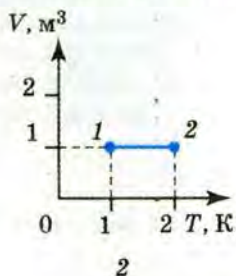
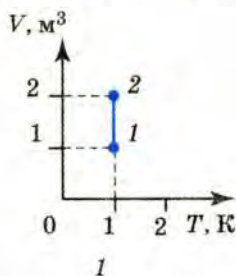
9. На мал. 216 у координатних осях pV зображено графік процесу зміни стану ідеального газу. Який із графіків, наведених на мал. 218, відповідає цьому процесу на діаграмі в координатних осях VT ?



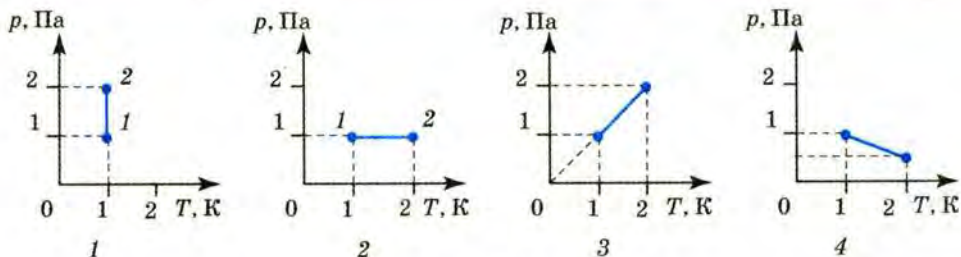
Мал. 216



Мал. 217



Мал. 218



Мал. 219

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед графіків 1—4 правильного немає.

10. На мал. 217 в координатних осях VT зображено графік процесу зміни стану ідеального газу. Який із графіків, наведених на мал. 219, відповідає цьому процесу на діаграмі в координатних осях pT ?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед графіків 1—4 правильного немає.

11. Як зміниться тиск даної кількості ідеального газу при переході зі стану 1 у стан 2 (мал. 220)?

А. Не зміниться.

Б. Збільшиться.

В. Зменшиться.

Г. Може збільшитися або зменшитися.

Д. Процес неможливий.

12. Якій точці на графіку зміни стану ідеального газу (мал. 221) відповідає мінімальне значення температури газу?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Температура в усіх станах однакова.

13. Густина газу в першій посудині в 4 рази більша за густину того самого газу в другій посудині. Чому дорівнює відношення середніх квадратичних швидкостей руху молекул газу в першій і в другій посудинах, якщо тиск газів однаковий?

А. 4. Б. 2. В. 1. Г. $1/2$. Д. $1/4$.

14. Оцініть об'єм, що займає газоподібний водень при температурі 0°C і тиску 10^5 Па, якщо його маса 2 кг. З наведених нижче значень виберіть найближче до отриманого вами результату.

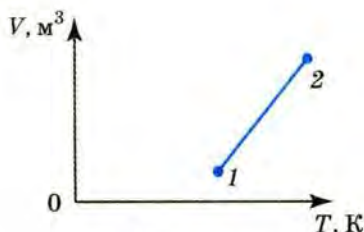
А. 22 м^3 . Б. 220 м^3 . В. $2,2\text{ м}^3$. Г. $0,22\text{ м}^3$. Д. $22 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$.

15. У герметично закритій посудині знаходяться вода і водяна пара. Як зміниться концентрація молекул водяної пари під час нагрівання посудини?

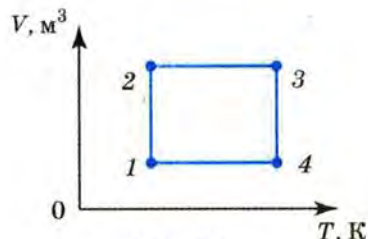
А. Збільшиться.

Б. Зменшиться.

В. Не зміниться.



Мал. 220



Мал. 221

- Г. Може збільшитися або зменшитися.
 Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

16. Як змінюється температура кипіння води у відкритій посудині при підвищенні атмосферного тиску?

- А. Підвищується.
 Б. Знижується.
 В. Не змінюється.
 Г. Може або підвищуватися, або знижуватися.
 Д. Кипіння стає неможливим.

17. Опади (сніг, дощ, град) утворюються у хмарах завдяки...

- А. Різному тиску насиченої водяної пари над водою і льодом.
 Б. Дифузії водяної пари від крапель до кристалів, які ростуть, а краплини випаровуються.

- В. Переохолодженням краплинам хмар і туманів.
 Г. Однаковому тиску насиченої водяної пари над водою і льодом.
 Д. Тому, що повітря досягає точки роси.

18. Яку з перерахованих нижче фізичних властивостей обов'язково має будь-який кристал?

- А. Твердість.
 Б. Анізотропія.
 В. Існування плоских граней.
 Г. Прозорість.
 Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

19. Під час занурення в рідину капілярної скляної трубки рівень рідини в ній піднявся на 4 мм над рівнем рідини в посудині. Якою буде в цьому капілярі висота підйому рівня тієї самої рідини у скляній трубці, що має в 2 рази більший діаметр?

- А. 16 мм. Б. 8 мм. В. 4 мм. Г. 2 мм. Д. 1 мм.

20. Коли підвісили вантаж до дротини, то вона видовжилася на 1 см. На скільки видовжиться така сама дротина, якщо її площа поперечного перерізу в 2 рази більша, а вантаж залишиться той самий?

- А. 1 см. Б. 2 см. В. 0,5 см. Г. 4 см. Д. 0,25 см.

21. Який із наведених записів виражає модуль Юнга?

- А. $\frac{\Delta l}{l_0}$. Б. $\frac{F}{S}$. В. $E|\epsilon|$. Г. $\frac{SE}{l_0}$. Д. $\frac{Fl_0}{S|\Delta l|}$.

22. Стосовно якої властивості анізотропні всі кристали?

- А. Всім кристалам присутня анізотропія росту: в природі не існує кристалів кулеподібної форми.
 Б. Анізотропні хімічні властивості всіх кристалів.
 В. Щодо анізотропії міцності.
 Г. Щодо анізотропії твердості.
 Д. Щодо оптичної анізотропії.

В а р і а н т І І

1. У посудині знаходиться 2 молі Гелію. Скільки атомів Гелію в посудині?

- А. 10^{23} . Б. $2 \cdot 10^{23}$. В. $6 \cdot 10^{23}$. Г. $12 \cdot 10^{23}$. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

2. Як зміниться тиск ідеального газу, якщо при сталій концентрації середня квадратична швидкість руху молекул збільшиться у 3 рази?

- А. Збільшиться в 9 разів.
- Б. Збільшиться в 6 разів.
- В. Збільшиться в 3 рази.
- Г. Не зміниться.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

3. Які фізичні параметри у двох тіл обов'язково повинні бути однаковими для того, щоб ці тіла знаходилися між собою в тепловій рівновазі?

- А. Температура.
- Б. Тиск.
- В. Середня квадратична швидкість руху молекул.
- Г. Температура і середня квадратична швидкість руху молекул.
- Д. Температура, тиск і середня квадратична швидкість руху молекул.

4. Яка з наведених нижче формул є основним рівнянням стану ідеального газу?

- А. $v = \frac{N}{N_A}$.
- Б. $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$.
- В. $p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$.
- Г. $\frac{pV}{N} = kT$.
- Д. $pV = \frac{m}{\mu} RT$.

5. Під час нагрівання ідеального газу середня квадратична швидкість теплового руху молекул збільшилась у 4 рази. Як при цьому зміниться абсолютна температура газу?

- А. Збільшиться у 2 рази.
- Б. Зменшиться у 2 рази.
- В. Збільшиться у 6 разів.
- Г. Збільшиться у 16 разів.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

6. У двох посудинах однакового об'єму знаходяться різні гази при однаковій температурі, у першій посудині — водень, у другій — кисень. Чому дорівнює відношення числа молекул Гідрогену до числа молекул Оксигену, якщо тиски газів однакові?

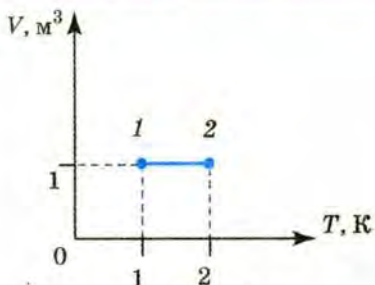
А. 1. Б. 16. В. 1/16. Г. Відношення може мати різні значення. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

7. Яке значення температури за шкалою Цельсія відповідає температурі 100 К за абсолютною шкалою?

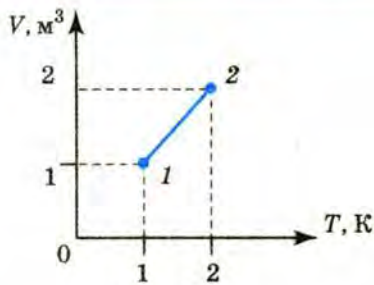
А. -373°C . Б. -173°C . В. $+173^\circ\text{C}$. Г. $+373^\circ\text{C}$. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

8. Як зміниться абсолютна температура ідеального газу, якщо при зменшенні його об'єму в 2 рази тиск зменшиться у 2 рази?

- А. Зменшиться у 2 рази.
- Б. Зменшиться у 4 рази.
- В. Не зміниться.



Мал. 222



Мал. 223

Г. Збільшиться у 2 рази.

Д. Збільшиться у 4 рази.

9. На мал. 222 у координатних осях VT зображено графік процесу зміни стану ідеального газу. Який із графіків, наведених на мал. 224, відповідає цьому процесу на діаграмі в координатних осях pT ?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед графіків 1—4 правильного немає.

10. На мал. 223 у координатних осях VT зображено графік процесу зміни стану ідеального газу. Який із графіків, наведених на мал. 225, відповідає цьому процесу на діаграмі у координатних осях pT ?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Серед графіків 1—4 правильного немає.

11. Як зміниться об'єм даної кількості ідеального газу при переході зі стану 1 у стан 2 (мал. 226)?

А. Не зміниться.

Б. Збільшиться.

В. Зменшиться.

Г. Може збільшитися або зменшитися.

Д. Процес неможливий.

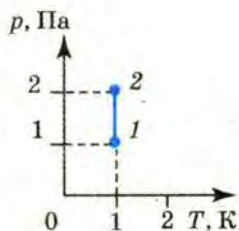
12. Якій точці на графіку зміни стану ідеального газу (мал. 227) відповідає мінімальне значення тиску газу?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Тиск газу в усіх станах однаковий.

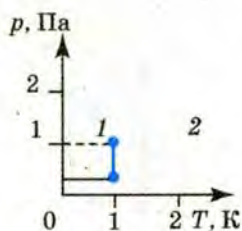
13. Чому дорівнює відношення середніх квадратичних швидкостей руху молекул газу Гідрогену та Оксигену при однакових значеннях температури газу?

А. 16. Б. 4. В. 1. Г. 1/4. Д. 1/16.

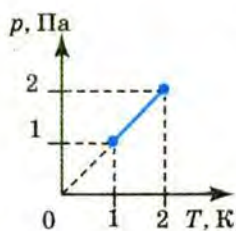
14. Оцініть (приблизно) масу повітря об'ємом 1 м^3 при нормальному атмосферному тиску і температурі 300 К. З наведених нижче значень виберіть найбільш близьке до отриманого вами результату.



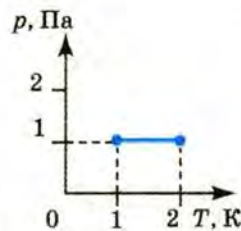
1



2

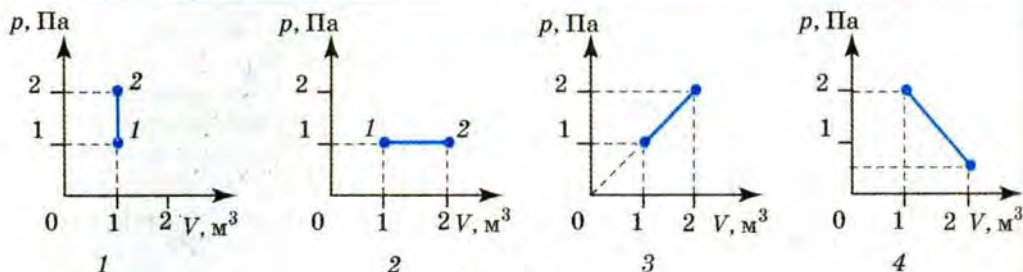


3



4

Мал. 224



Мал. 225

А. 1 г. Б. 10 г. В. 100 г. Г. 1 кг. Д. 10 кг.

15. У циліндрі, герметично закритому поршнем, знаходяться вода і насичена пара. Як змінюється тиск у циліндрі, якщо під час переміщення поршня об'єм зменшується, а температура залишається сталою?

- А. Збільшується.
- Б. Не змінюється.
- В. Зменшується.
- Г. Може залишатися незмінним або зменшуватися.
- Д. Може залишатися незмінним або збільшуватися.

16. Температура кипіння води у відкритій посудині дорівнює $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чи зміниться температура кипіння, якщо нагрівання води відбувається у герметично закритій посудині?

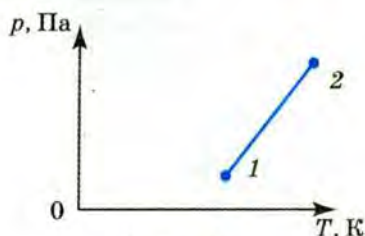
- А. Не зміниться.
- Б. Температура кипіння підвищиться.
- В. Температура кипіння знизиться.
- Г. Кипіння стане неможливим.
- Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

17. Як змінюється абсолютна і відносна вологість повітря при його нагріванні?

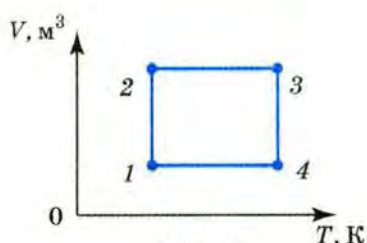
- А. Зменшується.
- Б. Збільшується.
- В. Абсолютна вологість не змінюється, а відносна зменшується.
- Г. Абсолютна вологість не змінюється, а відносна збільшується.
- Д. Відносна вологість не змінюється, а абсолютна зменшується.

18. Виділяється чи поглинається тепло під час конденсації водяної пари?

- А. Виділяється.
- Б. Поглинається.



Мал. 226



Мал. 227

В. Не виділяється і не поглинається.

Г. Процес може відбуватися і з поглинанням тепла, і з виділенням тепла.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

19. Під час занурення у рідину капілярної скляної трубки рівень рідини в ній піднявся на 4 мм над рівнем рідини у посудині. Якою буде в цьому капілярі висота підйому рівня рідини, якщо її коефіцієнт поверхневого натягу такий самий, а густина у 2 рази більша?

А. 1 мм. Б. 2 мм. В. 4 мм. Г. 8 мм. Д. 16 мм.

20. Коли підвісили вантаж до дротини, то вона видовжилася на 8 мм. На скільки видовжиться така ж дротина, якщо її довжина буде у 2 рази менша, а вантаж залишиться той самий?

А. 32 мм. Б. 16 мм. В. 8 мм. Г. 4 мм. Д. 2 мм.

21. Який із наведених записів виражає механічну напругу?

А. $\frac{\Delta l}{l_0}$. Б. $\frac{F}{S}$. В. $E|\varepsilon|$. Г. $\frac{SE}{l_0}$. Д. $\frac{Fl_0}{S|\Delta l|}$.

22. Деформації зсуву підлягають...

А. Фундаменти будинків, колони, стіни тощо.

Б. Канати, троси, балки будівельних ферм.

В. Деталі у початковій стадії процесу різання на стругальному верстаті.

Г. Вали машини, осі.

Д. Стержні, якщо один кінець закріплений.



Розділ 5 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

- Внутрішня енергія тіл
- Два способи зміни внутрішньої енергії тіла
- Перший закон термодинаміки
- Робота термодинамічного процесу
- Теплові машини. Холодильна машина

§ 57 ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ТІЛ

Ви вже знаєте, що теплові явища — це явища пов'язані з нагріванням і охолодженням тіл. Ми постійно зустрічаємось з цими явищами у повсякденному житті. Зміна дня і ночі супроводжується зміною температури тіл, що, в свою чергу, впливає на їх властивості, зміна пір року в наших широтах супроводжується змінами агрегатних станів речовини тощо. Людство здавна намагалось пояснити ці явища та використовувати їх. Пояснити теплові явища можна за допомогою величин, які характеризують світ молекул та атомів, тобто молекулярно-кінетичної теорії, з якою ви вже ознайомилися.

Молекулярно-кінетична теорія здобула визнання на початку ХХ ст., хоча теорія про атомну будову речовини зародилась ще в давній Греції. Величини, якими оперує молекулярно-кінетична теорія, а саме, маса молекул, швидкість їх руху, енергія — називають **мікроскопічними** (з грецької *мікрос* — малий).

Оскільки речовина складається з величезної кількості частинок (нагадаємо, що в 1 см^3 міститься близько 10^{23} молекул), описати рух кожної молекули чи атома і визначити (виміряти) сили взаємодії між ними дуже важко, а інколи і неможливо. Отже, методи молекулярної фізики для кількісного опису явищ у певних випадках виявляються занадто складними.

Проте, використовуючи багатовіковий досвід спостережень за перебігом теплових явищ і процесів, можна сформулювати їх загальний принцип,

виміряти за допомогою приладів такі величини, значення яких визначаються спільною дією величезної кількості молекул (наприклад, тиск, температура, об'єм, густина), а також вивести багато співвідношень між цими величинами, не знаючи нічого про будову речовини.

Метод вивчення властивостей тіл без урахування особливостей їх внутрішньої будови називають **термодинамічним**, величини якими він оперує — **макроскопічними** (з грецької *макрос* — великий), а розділ фізики, в якому вивчається цей метод, — **термодинамікою**.

Закони молекулярно-кінетичної теорії доповнюють термодинаміку, розширюючи при цьому можливість вивчення макроскопічних тіл, які складаються з великої кількості частинок. Так, будь-яке макроскопічне тіло має енергію, що зумовлена його мікростаном, а саме, кінетичною енергією хаотичного руху його молекул і потенціальною енергією їх взаємодії. Таку енергію називають **внутрішньою енергією** і позначають літерою U . Обчислити внутрішню енергію, визначаючи кінетичну і потенціальну енергію мільярдів частинок, неможливо, тому потрібно вміти визначати її, вимірявши макроскопічні величини, що характеризують стан тіла.

Це легко продемонструвати на прикладі ідеального одноатомного газу (гелію, аргону, неону та ін.), де внутрішня енергія становить лише суму кінетичних енергій його частинок. Середня кінетична енергія молекули таких газів дорівнює $3/2 kT$, а якщо молекул в газі N , то $U = \frac{3}{2} kTN$.

Оскільки $N = \frac{m}{\mu} N_A$, то $U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} N_A kT$ або

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT \quad (5.1)$$

Отже, враховуючи, що у даному рівнянні присутні тільки дві змінні величини, можна зробити такий висновок: внутрішня енергія одноатомного ідеального газу під час нагрівання збільшується, а при охолодженні зменшується, тобто залежить від одного й того ж параметра — його абсолютної температури.

Якщо ж будова ідеального газу складніша, ніж у одноатомного, то зміниться лише коефіцієнт пропорційності між його внутрішньою енергією і значенням абсолютної температури.

У реальних газах, рідинах і твердих тілах потенціальна енергія взаємодії мікрочастинок залежить від відстані між ними, а відстань між частинками впливає на об'єм тіла. Тому, внутрішня енергія тіла визначається його температурою T і об'ємом V .

Тіло або групу тіл, які взаємодіють з навколишнім середовищем, обмінюючись енергією, називають **термодинамічною системою**.

Найважливішими її параметрами є об'єм V , тиск p і температура T . Якщо стан термодинамічної системи не змінюється з часом — її параметри залишаються сталими, — то кажуть, що система перебуває у термодинамічній рівновазі.

❓ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які явища називаються тепловими? Наведіть приклади.
2. Які два підходи існують у фізиці щодо пояснення теплових явищ?
3. Від чого залежить внутрішня енергія тіла, виходячи з молекулярно-кінетичної теорії?
4. Які макропараметри визначають внутрішню енергію тіла?

§ 58 ДВА СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ТІЛА

З курсу фізики 8 класу вам відомо, що існують два види процесів, під час яких може змінюватися внутрішня енергія тіла: теплообмін і виконання роботи.

Внутрішня енергія тіла визначає його тепловий стан і змінюється при переході від одного стану до іншого. Енергія завжди передається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого. При цьому швидкість руху молекул холодного тіла збільшується, а гарячого — зменшується, кінетичні енергії молекул обох тіл вирівнюються.

Процес передачі енергії від більш нагрітого до менш нагрітого тіла називають теплообміном, а порцію переданої енергії називають **кількістю теплоти**.

Пригадаємо, як обчислюється зміна внутрішньої енергії тіл під час теплообміну:

під час нагрівання чи охолодження:

$$\Delta U = Q = cm(t_2 - t_1) = cm(T_2 - T_1); \quad (5.2)$$

під час плавлення і тверднення:

$$\Delta U = \pm \lambda m; \quad (5.3)$$

під час пароутворення і конденсації:

$$\Delta U = Q = \pm rm; \quad (5.4)$$

під час повного згоряння палива:

$$\Delta U = Q = qm. \quad (5.5)$$

Зверніть увагу на те, що кількість теплоти характеризує не внутрішню енергію тіла, а її зміну.

Якщо ж способом передачі є виконання механічної роботи, то кількість переданої енергії так і називають — **робочою**. Так, нагріти руки можна не тримаючи їх над обігрівником, а тертям долоні об долоню, розпалити вогнище без сірників — так, як це робили первісні люди: тертям сухих кусочків дерева. Ці й подібні до них приклади і досліди показують, що кількість теплоти і виконану роботу треба вважати мірою зміни внутрішньої енергії тіла.

Пригадаємо, що механічну роботу можна визначити за формулою $A = Fl \cos \alpha$ або $A = E_2 - E_1$, де E_2 — кінцеве, а E_1 — початкове значення кінетичної або потенціальної енергії.

Здатність тіл змінювати внутрішню енергію під час виконання роботи застосовують у техніці. Одним з прикладів є зварювання тертям. Зварювані деталі щільно притискають і потім приводять у швидке обертання одну відносно одної. Внаслідок роботи, що витрачається на подолання сили тертя між деталями, відбувається розігрівання і плавлення їх поверхонь, і при стисканні вони зварюються.

У тому, що нагрівання тіла може відбуватися без надання йому певної кількості теплоти, а за рахунок виконання роботи, неважко переконатися і на простих дослідах. Складіть долоні і потріть їх одна об одну, ви відчуєте тепло. Зігніть і розігніть кілька разів мідну пластинку чи дротину, і виявите, що місце згину нагрілося. Вдарте кілька разів молотком по шматку свинцю — виявиться, що свинець також нагрівся.

Таким чином, внутрішня енергія тіла може змінюватися двома способами: за допомогою теплообміну та внаслідок виконання механічної роботи.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії, якщо відбувається лише теплообмін?
2. Розкажіть, як виконана механічна робота впливає на внутрішню енергію тіла.

§ 59 ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Проаналізувавши механізм виникнення і зміни внутрішньої енергії тіла, зробимо висновок, що вона може бути змінена у процесі теплообміну чи виконання роботи, причому обидва ці процеси можуть відбуватись і одночасно.

Наприклад, газ у циліндрі під поршнем може нагріватися за рахунок передачі йому певної кількості теплоти, і одночасно може виконуватися робота на його розширення і стискання. Ще в 1842 р. німецький природодослідник Р. Майер теоретично, а згодом англійський фізик Дж. Джоуль у 1843 р. експериментально довели еквівалентність кількості теплоти і роботи як міри внутрішньої енергії. Ці теоретичні і практичні досліди дали змогу сформулювати закон збереження і перетворення енергії під час усіх процесів, які відбуваються в природі: **енергія не виникає і не зникає, а лише перетворюється у рівних кількостях з одного виду на інший.** Відповідно до закону збереження і перетворення енергії зміна внутрішньої енергії системи ΔU дорівнює сумі наданої їй кількості теплоти Q і роботи A' , виконаної над системою зовнішніми силами:

$$\Delta U = Q + A' . \quad (5.6)$$

Це твердження прийнято називати *першим законом (началом) термодинаміки*. У формулі A' означає роботу, яка виконується над системою зовнішніми силами (її вважають додатною величиною). Але можна розглянути і роботу A , виконану системою над зовнішніми тілами. Тоді її записують з від'ємним знаком і рівняння набуває вигляду

$$\Delta U = Q - A, \text{ або}$$

$$Q = \Delta U + A . \quad (5.7)$$

Вираз (5.7) теж є першим законом термодинаміки, але записаним в іншому вигляді. Він показує, що підведена до системи кількість теплоти Q йде частково на збільшення її внутрішньої енергії ΔU , а частково — на виконання системою роботи A над зовнішніми тілами.

Кожне тіло, не зважаючи на його стан, має певну внутрішню енергію, але воно не може мати певну кількість теплоти чи роботи. Так, газ може нагрітися за рахунок надання йому певної кількості теплоти або внаслідок виконання зовнішніми силами роботи (наприклад, стискання газу). Проте не можна однозначно відповісти, внаслідок якого з процесів — виконання роботи чи теплообміну — відбулося нагрівання газу.

Якщо система сама виконує роботу за рахунок теплообміну, то перший закон термодинаміки набуває іншого вигляду:

$$Q = \Delta U + p\Delta V, \quad (5.8)$$

тобто кількість теплоти, надана термодинамічній системі, приводить до зміни її внутрішньої енергії або виконання нею роботи чи того й іншого одночасно.

Останнє наведене формулювання дає змогу «опустити на землю» всіх замріяних учених щодо можливості створення вічного двигуна: не можна створити машину, яка б необмежено виконувала роботу, не отримуючи енергії ззовні. Отже, якщо кількість теплоти $Q = 0$, то $A = -\Delta U$, тобто робота виконується за рахунок зменшення внутрішньої енергії, яка не є безмежною.



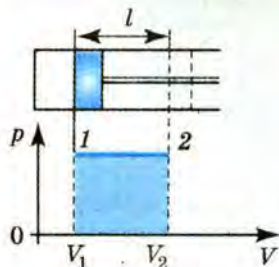
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яким фундаментальним законом природи є перший закон термодинаміки? Сформулюйте його.
2. Який важливий наслідок випливає з першого закону термодинаміки?

§ 60 РОБОТА ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Якщо розглядати дію теплових двигунів, у яких внутрішня енергія перетворюється в механічну, то можна спостерігати, що це відбувається за рахунок розширення пари чи газу, тобто внаслідок цього розширення виконується робота.

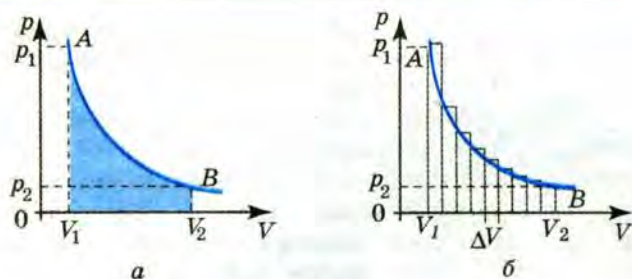
Розглянемо умови, за яких газ може виконувати роботу. Вважаємо, що газ нагрівається ізобарно (при сталому тиску; $p = \text{const}$) і певна його маса знаходиться в циліндрі з рухомих поршнем, який може без тертя переміщатися вздовж осі циліндра (мал. 228). Початкова температура T_1 газу дорівнює температурі навколишнього середовища; поршень перебуває у спокої, якщо зсередини і ззовні на нього діє однаковий тиск, який дорівнює, наприклад, атмосферному. Внаслідок нагрівання газ розширюється. Енергія, яка підводиться у цьому випадку, витрачається частково на нагрівання газу, частково на виконання ним роботи.



Мал. 228

Внаслідок підвищення температури газу до T_2 , збільшується об'єм, і поршень переміщається на відстань l . Отже, газ, розширюючись і переміщуючи поршень, виконує таким чином роботу проти зовнішніх сил. Оскільки тиск залишається сталим, то діюча на поршень сила дорівнює: $F = pS$, де S — площа поршня. Виконана газом робота $A = pSl$, де Sl — приріст об'єму газу $V_2 - V_1$.

Отже,
$$A = p(V_2 - V_1), \quad (5.9)$$



Мал. 229

тобто **робота, виконана газом під час ізобарного розширення проти зовнішніх сил, дорівнює добутку тиску газу і приросту його об'єму.**

Під час розширення газ виконує додатну роботу: передає енергію навколишнім тілам. Якщо газ стискається, то $V_2 < V_1$, і тому $A < 0$.

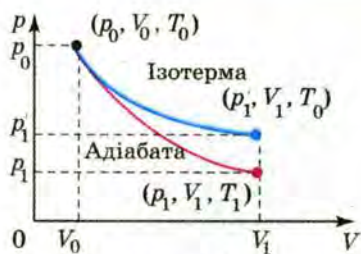
Скориставшись графічним зображенням ізобарного процесу (мал. 229), ми побачимо, що **робота газу дорівнює площі прямокутника висотою p і основою $V_2 - V_1$.** Якщо газ ізобарно стискається, то у цьому випадку роботу виконують над ним зовнішні сили, збільшуючи його потенціальну енергію. Графічно ця робота виражається тією самою площею.

Якщо говорити про зміну об'єму газу, то в багатьох випадках треба уявляти і зміну його тиску. Роботу в таких випадках знаходять за допомогою графічного методу. Можна наочно математично підтвердити, що при будь-якому процесі виконана газом робота дорівнює площі, обмеженій графіком цього процесу в системі координат pV , віссю абсцис і двома ординатами.

Продемонструємо це, розглядаючи графік ізотермічного процесу ($T = \text{const}$) у системі координат pV . Ізотерма має вигляд рівнобічної гіперболи AB (мал. 229, *a*).

Ми припустили, що робота газу, який розширюється ізотермічно, дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності p від V , віссю V і ординатами, що відповідають тискам p_1 і p_2 у початковому і кінцевому станах газу. Це твердження можна легко довести, якщо розбити площу криволінійної фігури, обмеженої гіперболою, вертикальними лініями на ряд вузьких ділянок (мал. 229, *б*). За дуже малої зміни об'єму V можна припустити, що тиск на кожній окремій ділянці сталий, або, інакше кажучи, він змінюється під час процесу стрибками при переході від однієї ділянки до другої. Тому робота розширення газу на ΔV зобразиться площею вузького прямокутника. Робота розширення газу на $V_2 - V_1$ дорівнюватиме приблизно площі одержаної «східчастої» фігури, яку можна обчислити, додаючи площі окремих прямокутних ділянок. Природно, що знайдена в такий спосіб площа буде трохи більшою за площу, обмежену гіперболою, але якщо поділити графік на більшу кількість вузьких ділянок, то спадання кривої тиску меншими стрибками наблизитиметься до дійсного безперервного спадання кривої тиску. Отже, у граничному випадку (коли ширина ділянки ΔV прямує до нуля) графік ізотермічного процесу визначатиме роботу розширення газу.

При ізохорному процесі об'єм газу є сталий $V = \text{const}$, $\Delta V = 0$, змінюються його тиск і температура. Оскільки об'єм газу не змінюється, то газ не



Мал. 230

теплоізолюваній системі, тобто за відсутності теплообміну з навколишніми тілами.

Оскільки в такому разі $Q = 0$, то згідно з першим законом термодинаміки вся виконана зовнішніми силами робота витрачається на зміну внутрішньої енергії системи: $A = \Delta U$.

Звичайно, за реальних умов досягти такого результату практично неможливо, оскільки не існує ідеальних ізоляторів тепла. Проте наблизитися до цієї умови можна кількома способами. Наприклад, створити оболонки з низькою теплопровідністю (за принципом термоса) або здійснити процес настільки швидко, щоб теплообмін між системою і навколишніми тілами був надто малим і ним можна було знехтувати.

Наприклад, швидке стискання газу викликає зростання внутрішньої енергії, що дорівнює значенню виконаної роботи A , і газ нагрівається. На цьому явищі, зокрема, побудовано самозаймання паливної суміші у дизельних двигунах. І навпаки, якщо газ сам виконує роботу внаслідок стрімкого розширення, то його внутрішня енергія зменшується і температура газу знижується. Ця властивість адіабатного процесу покладена в основу зрідження газу. Прикладом адіабатного процесу є також вибух, плавлення запобіжника під час короткого замикання тощо.

Графічно на координатній площині pV адіабатний процес зображується кривою, яка називається **адіабатою** (мал. 230). Вона спадає стрімкіше, ніж ізотерма, оскільки при адіабатному процесі зміна тиску відбувається за рахунок одночасного збільшення об'єму і зменшення температури. Цей висновок підтверджує також формула $p = nkT$, адже збільшення об'єму газу обумовлює зменшення концентрації молекул газу, і тому спадання кривої тиску залежить від двох параметрів — температури газу T і концентрації молекул n , які зумовлюють його.

Таким чином, унаслідок адіабатного розширення газу відбувається зміна його стану, що характеризується зменшенням внутрішньої енергії; під час адіабатного стискання газу його внутрішня енергія зростає.

❓ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. У яких ізопроцесах виконується механічна робота?
2. Який процес називається адіабатним? Яка умова його перебігу?
3. Який процес можна вважати адіабатним у реальних умовах?
4. Як називається крива, що відображає адіабатний процес? Схарактеризуйте її властивості.

виконує ніякої роботи проти зовнішніх сил: $A = 0$, тобто в процесі ізохорного нагрівання вся надана газу теплота повністю витрачається на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U$.

Термодинаміка вивчає ще один процес, який широко застосовується на практиці, зокрема в теплових двигунах. Це так званий адіабатний процес.

Адіабатний процес — це термодинамічний процес зміни параметрів газу, що відбувається в

§ 61 ТЕПЛОВІ МАШИНИ. ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА

Якщо звернутися до історії фізики та машинобудування, то можна з'ясувати, що тепловий двигун з'явився на початку XVIII ст. У Росії він був запропонований І. І. Ползуновим (1765). Запатентував універсальний паровий двигун у 1784 р. Дж. Уатт. Революційною працею з підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) теплових двигунів вважають працю С. Карно «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу», що була видана у 1824 р. У ній Карно запропонував цикл ідеальної теплової машини.

Тепловий двигун — це пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива у механічну.

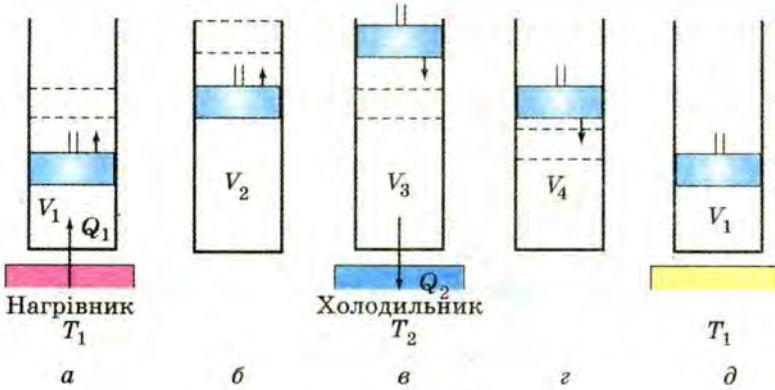
Енергія, яка виділяється під час згоряння палива, через теплообмін передається газу. Газ, розширюючись, виконує роботу проти зовнішніх сил і надає руху механізму (мал. 231).



Мал. 231

Нехай ідеальний газ об'ємом V_1 міститься у закритому циліндрі з поршнем (мал. 232) під тиском p_1 . Поставимо циліндр на нагрівник, температура якого T_1 підтримується сталою (мал. 232, а). Ми будемо спостерігати ізотермічний процес, що супроводжується зміною об'єму і тиску газу відповідно V_2, p_2 та виконанням роботи A_1 за рахунок кількості теплоти Q_1 , одержаної від нагрівника. Відповідно до графіка в системі координат pV процес відобразимо ізотермою 1—2 (мал. 233).

Припустимо, що далі газ буде розширюватися адіабатно, тобто без теплообміну з навколишнім середовищем. Газ виконає додатну роботу розширення A_2 за рахунок внутрішньої енергії, змінивши стан з об'ємом V_2 і тиском p_2 на стан з об'ємом V_3 і тиском p_3 (мал. 232, б). При цьому буде відбуватися охолодження, яке супроводжується зміною температури від T_1 до T_2 . На графіку (мал. 233) цьому процесу буде відповідати адіабата 2—3.



Мал. 232

Після цього поставимо циліндр на холодильник, температура якого T_2 підтримується сталою. Будемо спостерігати ізотермічний процес, при якому газ зі стану з об'ємом V_3 і тиском p_3 буде переходити до стану з об'ємом V_4 і тиском p_4 (мал. 232, в). При стисканні газу зовнішні сили виконують від'ємну роботу ($-A_3$), і щоб температура газу не змінилася, вона повинна відповідати кількості теплоти, відданої холодильнику $Q_2 = A_3$. На графіку цей процес відповідатиме ізотермі 3—4 (мал. 233). Проте стан V_4, p_4 добираємо так, щоб подальше адиабатне стискання газу при досягненні температури T_1 привело до замикання циклу, тобто до об'єму V_1 .

Нарешті в точці V_4, p_4 знову без теплообміну (мал. 232, г) за допомогою адиабатного стискання повернемо газ у вихідний стан (мал. 232, д), приводячи до збільшення його внутрішньої енергії і підвищення температури до T_1 . На графіку цьому процесу відповідає адиабата 4—1 (мал. 233).

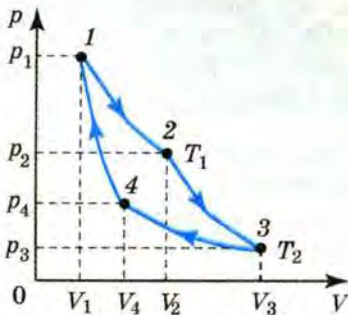
Цикл, який ми отримали, складається з двох ізотермічних і двох адиабатних процесів; він дістав назву циклу Карно і становить один цикл роботи ідеальної теплової машини. Під час розширення робоче тіло виконує роботу, а під час стискання роботу над тілом виконують зовнішні сили. Після кожного циклу робоче тіло повертається у вихідний стан.

Закон збереження й перетворення енергії для циклу Карно полягає у тому, що енергія, одержана робочим тілом від навколишнього середовища, дорівнює енергії, яку тіло віддало навколишньому середовищу. Навколишнє середовище віддає кількість теплоти Q_1 під час розширення робочого тіла і виконує роботу $A_3 + A_4$ на стискання.

Робоче тіло виконало роботу $A_1 + A_2$ під час розширення і віддало кількість теплоти Q_2 під час стискання. $Q_1 + A_3 + A_4 = Q_2 + A_1 + A_2$, або, враховуючи, що $A_1 = A_4$,

$$A_1 - A_3 = Q_1 - Q_2.$$

Різниця робіт $A_1 - A_3$ є корисною роботою, що виконує робоче тіло внаслідок даного циклічного процесу. Вона дорівнює різниці кількостей теплоти, підведеної під час розширення газу і відведеної під час його стискання.



Мал. 233

Для характеристики ефективності циклу перетворення внутрішньої енергії у механічну, а значить, і теплової машини, вводиться коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу, або машини. Він визначається відношенням роботи $A_1 - A_3$, що використовується у даному циклі, до роботи A_1 , яку можна було б одержати внаслідок повного перетворення у неї всієї кількості теплоти Q_1 , підведеної до газу:

$$\eta = \frac{A_1 - A_3}{A_1}, \quad (5.10)$$

або, враховуючи попередню рівність, маємо

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (5.11)$$

За умови ідеального процесу перетворення внутрішньої енергії в механічну, найвищий тепловий ККД матиме вигляд

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (5.12)$$

де T_1 — максимальна температура робочого тіла (газу, пари), T_2 — мінімальна температура, за якої робоче тіло віддає частину внутрішньої енергії холодильнику. Оскільки T_2 — температура холодильника або відпрацьованих продуктів горіння — не може дорівнювати абсолютному нулю, то максимальний тепловий ККД машини не може дорівнювати одиниці (100 %).

Проте машину можна примусити працювати і за оборотним циклом Карно, коли внаслідок виконаної роботи від системи віднімається деяка кількість теплоти. У цьому разі охолодження досягається за рахунок виконання роботи, теплота примусово переходить від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, а теплова машина перетворюється на холодильну машину.

За оборотним циклом від поршня з нижчою температурою T_2 (мал. 232, в) відбирається кількість теплоти Q_2 і віддається поршню з вищою температурою T_1 (мал. 232, а) кількість теплоти Q_1 . Для кругового процесу $Q = A$, але є умова:

$$Q = Q_2 - Q_1 < 0, \text{ тому } A < 0 \text{ і } Q_2 - Q_1 = A', \text{ або } Q_1 = Q_2 + A',$$

тобто кількість теплоти Q_1 , віддана системою джерелу теплоти з вищою температурою T_1 , більша за кількість теплоти Q_2 , одержаної від джерела теплоти з нижчою температурою T_2 на значення роботи A' , виконаної над системою. Таким чином, без виконання роботи не можна відбирати теплоту від менш нагрітого тіла і віддавати її більш нагрітому.

Ефективність роботи холодильної машини характеризують **холодильним коефіцієнтом**, який визначається відношенням кількості теплоти Q_2 , отриманої від поршня з нижчою температурою, до роботи A' , яка витрачається на приведення холодильної машини в дію:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (5.13)$$



Мал. 234

Прикладом найбільш поширеної холодильної машини є домашній холодильник (мал. 234). Робочу систему холодильника заповнюють рідиною, яка легко випаровується (фреон, аміак та ін.), її називають *холодоагентом*.

Таким чином, згідно з дослідом про певну спрямованість теплопередавання: **теплота сама по собі переходить завжди від гарячих тіл до холодних.**

Природно, що внаслідок перебігу фізичних процесів навколишній світ зазнає певних змін. Наприклад, унаслідок механічної взаємодії змінюються координати тіл або їх швидкості. Термодинамічні процеси супроводжуються змінами станів системи, яка характеризується певними макро- і мікропараметрами.

Ці зміни, як правило, такі, що не допускають можливості довільного повернення системи у початковий стан. Тому довільні **природні процеси є необоротними**. Оборотними вони стають унаслідок сторонніх впливів або складних процесів, які компенсують ці зміни.

Напрямом перебігу теплових процесів встановлює **другий закон термодинаміки**, який уперше сформулював німецький учений Р. Клаузіус у 1850 р.: **у природі неможливий процес, під час якого теплота довільно переходила б від менш нагрітих до більш нагрітих тіл.**

Пізніше У. Томсон (лорд Кельвін) дав інше формулювання другого закону термодинаміки: **неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним результатом якого буде виконання роботи за рахунок теплоти, відібраної у нагрівника**. Отже, другий закон термодинаміки доповнює закон збереження і перетворення енергії у теплових процесах можливим напрямом їх довільного перебігу в природі та заперечує можливість створення вічного двигуна.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке цикл Карно? З яких процесів він складається?
2. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини? Яке максимальне його значення можуть мати реальні теплові машини?
3. Який принцип дії теплової машини? Які обов'язкові складові частини вона має?
4. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії теплової машини? Чи може він бути більшим за одиницю?
5. Розкажіть, за яким принципом працює холодильна машина. У чому її відмінність від теплової машини?
6. Що характеризує ефективність холодильної машини?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. У циліндричній посудині під поршнем із вантажем загальною масою $m_1 = 200$ кг міститься $m_0 = 2,5$ г водню при температурі $t_1 = 27$ °С. Внутрішній діаметр посудини $d = 20$ см. Визначте роботу, яку виконує водень при його ізобарному нагріванні до $t_2 = 100$ °С. Тертя між поршнем і циліндром відсутнє.

Розв'язання.

При ізобарному розширенні робота $A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$.

З об'єданого газового закону для ізобарного процесу знаходимо $V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$. Тоді $A = pV_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1}$. Із закону Менделєєва—Клапейрона маємо

$$pV_1 = \frac{m_0}{\mu} RT_1. \text{ Остаточно робота } A = \frac{m_0}{\mu} R(T_2 - T_1), A = 760 \text{ Дж.}$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[A] = \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} = \text{Дж.}$$

В і д п о в і д ь: $A = 160$ Дж.

2. Яку потужність повинен мати двигун морозильника, що працює за циклом Карно, в камері якого підтримується температура $t_2 = -23$ °С, якщо в неї через стінки за час $\tau = 1$ год надходить кількість теплоти $0,1$ МДж? Температура радіатора морозильника $t_1 = 57$ °С, а ККД двигуна $0,8$.

Р о з в' я з а н н я. Двигун морозильника працює за циклом Карно (випадок ідеальної теплової машини). Нагрівником слугує радіатор, температура якого $T_1 = 330$ К, холодильником — морозильна камера $T_2 = 250$ К (мал. 235).

Якщо споживана потужність двигуна P , а ККД дорівнює η , то за час τ він виконає роботу $A = P\tau\eta$. (Це корисна робота двигуна, що приводить у дію холодильну машину.)

Для холодильної машини: $\eta_x = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, разом з тим, $\eta_x = \frac{A}{Q_1}$, $Q_1 = A + Q_2$.

Отже, $\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{A}{A + Q_2}$, де Q_2 — це теплота,

яку потрібно відібрати від морозильної камери. (За умовою за час $\tau = 1$ год до морозильної камери надходить кількість теплоти $Q_2 = 0,1$ МДж.) Враховуючи значення $A = P\tau\eta$, одержуємо $\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{P\tau\eta}{P\tau\eta + Q_2}$.

$$\text{Звідки } P = \frac{Q_2(T_1 - T_2)}{\tau\eta T_2}.$$

Підставивши відомі значення, отримуємо $P = 11$ Вт.

В і д п о в і д ь: $P = 11$ Вт.



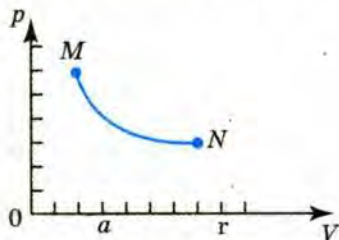
Мал. 235

Рівень А

376. Обчисліть внутрішню енергію одноатомного газу з кількістю речовини 10 моль при температурі 27°C .
377. На скільки змінюється внутрішня енергія 200 г гелію при збільшенні температури на 20 K ?
378. Як змінюється внутрішня енергія ідеального газу: а) при ізобарному розширенні; б) при ізотермічному розширенні; в) при ізохорному збільшенні тиску?
379. Визначте внутрішню енергію гелію, який займає об'єм 60 м^3 при тиску 100 кПа .
380. Об'єм одноатомного ідеального газу збільшився втричі, а тиск зменшився вдвічі. Як змінюється при цьому внутрішня енергія газу?
381. Під час розширення деякої маси ідеального газу тиск збільшився на 25% , а об'єм зменшився на 20% . Як змінилася внутрішня енергія газу?
382. Порівняйте внутрішні енергії однакових мас аргону і гелію при однаковій температурі.
383. У циліндрі під поршнем міститься гелій. Для його нагрівання при сталому тиску було витрачено 10 кДж теплоти. Визначте зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану газом.
384. Яку роботу виконує газ, розширюючись ізобарно під тиском 2 атм від об'єму $1,6\text{ л}$ до об'єму $2,5\text{ л}$?
385. При ізобарному нагріванні об'єм повітря, стиснутого до 5 атм , збільшився від $0,48$ до $0,75\text{ м}^3$. Обчисліть роботу, виконану повітрям.
386. Газ міститься під поршнем циліндра при температурі 0°C і під тиском $2 \cdot 10^5\text{ Па}$. Яку роботу виконає 1 л газу під час ізобарного розширення, якщо температура газу підвищиться на 20°C ?
387. Газ, який під поршнем циліндра має температуру 150°C , адіабатно розширюється. Яку роботу виконав газ, якщо він охолодився до 80°C ?
388. Унаслідок тертя двох тіл, теплоємність яких однакова і дорівнює 800 Дж/К , температура через 1 хв підвищилася на 30 K . Обчисліть середню потужність під час тертя.
389. Дві однакові сталеві кульки впали з однієї і тієї самої висоти. Перша впала у ґрунт, а друга, вдарившись об камінь, відскочила й була піймана рукою на якійсь висоті. Яка з кульок дужче нагрілася?
390. Свинцева куля летить із швидкістю 200 м/с і влучає в земляний вал. На скільки градусів нагріється куля, якщо 78% її кінетичної енергії перетворилося на внутрішню?
391. Двигун автомобіля потужністю $36,8\text{ кВт}$ використовує 10 кг бензину за годину. Визначте ККД двигуна.
392. Визначте масу бензину, яку споживає двигун мопеда потужністю $0,88\text{ кВт}$ протягом $0,5\text{ год}$, якщо ККД двигуна становить 19% .
393. Для роботи двигуна, ККД якого становить 18% , виділено $4,9\text{ т}$ нафти. Визначте, на скільки днів вистачить цього запасу, якщо середня потужність двигуна дорівнює 25 кВт . Робочий день триває 8 год .

Рівень В

394. У сталевому балоні міститься гелій масою 0,5 кг при температурі 10 °С. Як зміниться внутрішня енергія гелію, якщо його температура підвищиться до 30 °С?
395. Для ізобарного нагрівання газу на 500 К було надано 9,4 МДж теплоти. Кількість речовини газу дорівнює 800 моль. Визначте роботу газу і приріст його внутрішньої енергії.
396. Зі зменшенням тиску одноатомного газу в 3,6 раза його об'єм збільшився на 20 %. Як змінилася внутрішня енергія?
397. Під час нагрівання деякої маси одноатомного ідеального газу його тиск збільшився в n разів, а об'єм — у k разів. Як змінилася внутрішня енергія газу?
398. Температура повітря в кімнаті, що має об'єм 70 м³, дорівнює 280 К. Після того, як витопили піч, температура підвищилася до 296 К. Обчисліть роботу повітря, яку воно виконало під час розширення, якщо тиск сталий і дорівнює 100 кПа.
399. Порівняйте роботи, що їх виконують однакові маси водню і кисню під час ізобарного нагрівання до однієї й тієї самої температури.
400. 1 л повітря ізохорно нагріли від 9 °С до 100 °С. На скільки змінилась його внутрішня енергія? Яку роботу воно виконало?
401. Теплоізольована герметична посудина, заповнена аргоном, рухається зі швидкістю 10 м/с. На скільки підвищиться температура газу, якщо посудина миттєво зупиниться?
402. Тиск газу під поршнем циліндра становить 490 кПа. Яку роботу виконує газ, якщо його при сталому тиску нагрівають до температури, удвічі більшої від початкової? Початковий об'єм газу 10 л.
403. Тиск газу під поршнем циліндра 8 атм, а температура 150 °С. Яку роботу виконає 1 л газу під час ізобарного розширення, якщо температура газу підвищиться на 20 °С?
404. Зміни об'єму і тиску газу задано кривою MN (мал. 236). Визначте роботу газу в цьому процесі, якщо одна поділка на осі OV відповідає 2 дм³, а на осі Op — 4 атм.
405. Повітря ізотермічно розширюється від 2 до 10 л. Початковий тиск 8 атм. Визначте графічно роботу розширення повітря.
406. Під час ізотермічного стискання газу від 6 до 2 л його тиск змінився відповідно від 3 до 9 атм. Побудуйте ізотерму газу і за нею визначте роботу зовнішньої сили та тиск газу.
407. Середній тиск газу в циліндрі 1,2 МН/м². Площа поршня 300 см², довжина ходу 0,5 м. Визначте, на скільки зменшиться внутрішня енергія газу за один хід поршня.
408. Із висоти h вільно падає шматок металу, питома теплоємність якого c . На скільки градусів Δt підвищилася його температура під час удару об землю, якщо вважати, що k % механічної енергії шматка металу перетворюється на внутрішню?



Мал. 236

409. На скільки градусів нагріється мідний дріт розміром $2 \times 6 \text{ см}^2$ і товщиною 5 мм при нарізуванні на ньому різьби кроком 0,75 мм, якщо до воротка треба прикласти момент сили $5 \text{ Н} \cdot \text{м}$? Вирізаною масою знехтувати.
410. Свинцева куля масою 150 г падає на мідну пластинку об'ємом 600 см^3 з висоти 6 м. На скільки градусів зміниться температура тіл, якщо вся кінетична енергія витрачається на нагрівання, початкова температура тіл однакова?
411. Куля масою 10 г, що летіла зі швидкістю 1000 м/с, потрапляє в крижину. Визначте, яка маса льоду розтане при цьому, коли відомо, що 60 % кінетичної енергії перетворилось у внутрішню. Початкова температура льоду $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
412. Маленька свинцева кулька об'ємом $0,02 \text{ см}^3$ рівномірно падає у воді. Яка кількість теплоти виділиться при переміщенні кульки вниз на 6 м?
413. Потяг масою $15 \cdot 10^5 \text{ кг}$ їде по горизонтальному шляху зі швидкістю 60 км/год. При цьому тепловоз спалює 600 кг нафти за годину. Яку швидкість розвине потяг за тих самих умов на шляху з підніманням 1 : 100? ККД тепловоза 28 %.
414. В ідеальній тепловій машині за рахунок кожного кілоджоуля енергії, що її надає нагрівник, виконується робота 300 Дж. Визначте ККД машини і температуру нагрівника, якщо температура холодильника 280 К .
415. У паровій турбіні витрачається $0,35 \text{ кг}$ дизельного пального на $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Температура пари, яка надходить у турбіну, дорівнює $250 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодильника $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Обчисліть фактичний ККД турбіни і порівняйте його з ККД ідеальної теплової машини, яка працює за тих самих температурних умов.



Історична довідка

Зародження термодинаміки. Після відкриття закону збереження і перетворення енергії теплові явища вивчалися у двох напрямках. По-перше, вчені хоча і припускали, що тепло є рухом, але детально теплового руху не вивчали. Вони враховували лише той факт, що тепло здатне перетворюватися на роботу згідно із законом збереження і перетворення енергії; досліджували особливості енергії теплового руху порівняно з іншими видами енергії: механічною, електричною і т. д. — і особливості перетворення теплової форми руху в інші. Цей напрям досліджень у галузі вивчення теплових явищ привів до створення особливого розділу фізики — **термодинаміки**. Інший напрям полягав у вивченні характеру руху частинок, із яких складаються тіла. Розвиток цього напрямку досліджень привів до створення **кінетичної теорії тепла**.

Основні заслуги у розвитку термодинаміки належать німецькому фізику Р. Клаузіусу та англійському фізику У. Томсону. Вже у 1850 р., тобто відразу ж після відкриття закону збереження і перетворення енергії, Клаузіус написав статтю, у якій досліджував роботу теплової машини на основі уявлення, що тепло є рухом. Клаузіус вважав, що при роботі теплової машини не вся кількість тепла, взята у нагрівника, передається холодильнику. Частина цього тепла перетворюється у роботу, яку виконує машина.

Якщо тілу передали деяку кількість тепла ΔQ , то тіло виконує зовнішню роботу ΔA і одночасно змінює свою енергію на ΔU , оскільки змінюється його температура, об'єм, стан взагалі. Енергія ΔU отримала назву **внутрішньої енергії тіла**. Враховуючи закон збереження і перетворення енергії, Клаузіус записав: $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$. Це значить, що кількість тепла, надана тілу, витрачається на збільшення його внутрішньої енергії і на виконання зовнішньої роботи. Це положення Клаузіус назвав основним положенням механічної теорії тепла. У подальшому це твердження стали називати **першим законом термодинаміки**.

Розглядаючи роботу теплової машини, Клаузіус погоджується із Карно у тому, що для її роботи потрібні нагрівник, холодильник і робоче тіло. Досліджуючи дану проблему, Клаузіус приходив до наступного твердження, яке пропонує назвати **другим законом термодинаміки**: тепло завжди виявляє тенденцію до вирівнювання температурної різниці шляхом переходу від тепліших тіл до холодніших. Пізніше вчений формулює це по-іншому: перехід тепла від більш холодного тіла до більш нагрітого неможливий без компенсації, тобто цей перехід неможливий без яких-небудь змін із іншими тілами: зміни їх положення, об'єму, температури і т. д.

Одночасно із Клаузіусом до аналогічних висновків приходив Томсон. Він формулює перший та другий закони термодинаміки. Формулювання Томсона у сучасній редакції звучить так: неможливо неперервно отримувати роботу лише за рахунок охолодження окремого тіла нижче від температури найхолоднішого із навколишніх тіл. У подальшому виникли різні формулювання цього твердження, але всі вони зводилися до одного: вічний двигун другого роду неможливий. Під вічним двигуном другого роду розумівся такий пристрій, який би давав змогу неперервно забирати тепло в навколишніх тіл і перетворювати його на роботу, тобто здійснювати роботу лише за рахунок охолодження навколишніх тіл.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

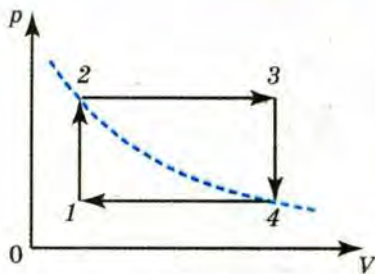
1. Що можна сказати про внутрішні енергії однакових мас аргону і гелію при однаковій температурі?
2. Ви знаєте, що внутрішню енергію тіла можна змінити двома способами. Якими? Чим вони розрізняються між собою?
3. У чому суть першого закону термодинаміки?
4. Яка відмінність між твердженнями: «газ виконав роботу» і «робота виконана над газом»?
5. Якою є відмінність між двигуном внутрішнього згорання і холодильною камерою?
6. Що містить у собі поняття «теплові насоси»?

Що я знаю і вмію робити

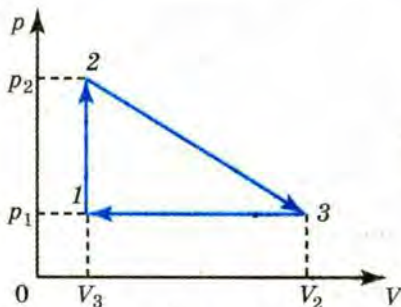
Я вмію використовувати графіки під час розв'язування задач

1. Один моль ідеального газу виконує замкнутий процес, який складається з двох ізохор та двох ізобар (мал. 237). Температура в точці 1 дорівнює T_1 , в точці 3 — T_3 . Визначте роботу, яку виконує газ за один цикл, якщо точки 2 і 4 лежать на одній ізотермі.

2. Один моль повітря міститься у герметичній посудині за нормальних атмосферних умов, а його стан характеризується точкою 1 на діаграмі pV (мал. 238). З повітрям послідовно здійснюють коловий процес $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, причому $p_2 = 3p_1$, $p_3 = p_1$, а точки 2 і 3 належать одній ізотермі. Визначте:



Мал. 237



Мал. 238

1) роботу повітря на ділянках $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$; 2) теплоту, отриману газом на цих ділянках.

3. У циліндрі під поршнем міститься водень масою $0,02$ кг при температурі 300 К. Водень почав розширятись адиабатно, збільшивши свій об'єм у п'ять разів, а потім був стиснений ізотермічно, причому об'єм газу зменшився в п'ять разів. Визначте температуру в кінці адиабатного розширення і роботу, яку виконав газ. Зобразіть процес графічно.

Я знаю закони термодинаміки

4. Автомобільна шина накачана до тиску 220 кПа при температурі 290 К. Під час руху вона нагрілась до температури 330 К і луснула. Вважаючи процес, який відбувається після пошкодження шини, адиабатним, визначте зміну температури повітря, що вийшло з неї. Зовнішній тиск повітря дорівнює 100 кПа.

5. Одноатомний ідеальний газ масою m із початковою температурою 300 К ізохорно нагрівають до температури 500 К, а потім ізобарно – до температури 700 К. Після цього газ ізохорно охолоджують до початкового тиску й ізобарно повертають у вихідний стан. Обчисліть ККД циклу.

6. При ізобарному розширенні двохатомного газу була виконана робота A . Яка кількість теплоти була надана газу?

7. Які були початкові об'єм і температура гелію масою m , який міститься під поршнем у циліндрі, якщо при його охолодженні до 0°C потенціальна енергія вантажу вагою P , який лежить на поршні, зменшилась на ΔE ? Площа поршня – S , атмосферний тиск – p_0 .

8. При ізотермічному розширенні кисню кількістю речовини 1 моль, який мав температуру 300 К, газу було надано 2 кДж теплоти. У скільки разів збільшився об'єм газу?

9. Яка кількість теплоти виділиться, якщо азот масою 1 г при температурі 280 К під тиском $0,1$ МПа ізотермічно стиснути до тиску 1 МПа?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант I

1. Як зміниться внутрішня енергія ідеального газу, якщо його тиск і абсолютна температура збільшаться у 2 рази?

- А. Збільшиться у 8 разів.
- Б. Збільшиться в 4 рази.
- В. Збільшиться у 2 рази.

Г. Не зміниться.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

2. Як зміниться внутрішня енергія ідеального газу під час адіабатного розширення?

А. $\Delta U = 0$. Б. $\Delta U > 0$. В. $\Delta U < 0$. Г. ΔU може мати будь-яке значення.

Д. Внутрішня енергія ідеального газу завжди дорівнює нулю.

3. У якому процесі зміна внутрішньої енергії системи дорівнює кількості переданої теплоти?

А. В ізохорному.

Б. В ізобарному.

В. В ізотермічному.

Г. В адіабатному.

Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

4. Газу передали кількість теплоти 100 Дж, і зовнішні сили здійснили над ним роботу 300 Дж. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу?

А. 0. Б. 100 Дж. В. 200 Дж. Г. 300 Дж. Д. 400 Дж.

5. Яку роботу виконує газ при переході зі стану 1 у стан 2 (мал. 239)?

А. 0. Б. 300 Дж. В. 600 Дж. Г. 900 Дж. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

6. Для аналізу ізотермічного ($T = \text{const}$), ізобарного ($p = \text{const}$) та ізохорного ($V = \text{const}$) процесів використовують рівняння першого начала термодинаміки $\Delta U = A + Q$. Кількість теплоти, яка передається системі, при ізотермічному процесі...

А. Повністю йде на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U$, тому що $\Delta V = 0$ і $p\Delta V = 0$.

Б. Частково витрачається на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U + p\Delta V$.

В. Повністю перетворюється на роботу розширення: $Q = A$, тому що $\Delta U = 0$.

Г. Не підводиться, а робота виконується за рахунок внутрішньої енергії газу: $A = -\Delta U$.

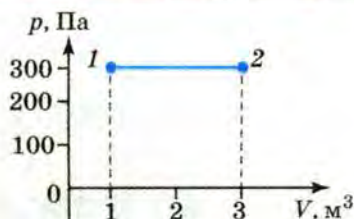
Д. Не можна перевести від більш холодної системи до більш гарячої при відсутності в ній інших одночасних змін.

7. Теплова машина за цикл отримує від нагрівача кількість теплоти 100 Дж і віддає холодильнику 60 Дж. Який ККД теплової машини?

А. $\approx 67\%$. Б. 60% . В. 40% . Г. 25% . Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

8. Який із виразів справедливий для теплової машини?

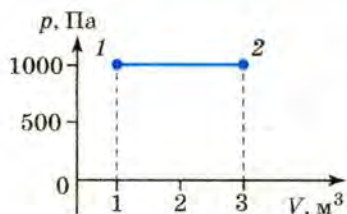
А. $Q_1 = Q_2$. Б. $Q_1 < Q_2$. В. $Q_1 > Q_2$. Г. $Q_1 \leq Q_2$. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.



Мал. 239

В а р і а н т II

1. Як зміниться внутрішня енергія ідеального газу, якщо його тиск і об'єм збільшаться у 2 рази?



Мал. 240

- А. Збільшиться у 8 разів.
 Б. Збільшиться в 4 рази.
 В. Збільшиться у 2 рази.
 Г. Не зміниться.
 Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.
2. Як зміниться внутрішня енергія ідеального газу під час ізотермічного стискання?
 А. $\Delta U = 0$. Б. $\Delta U > 0$. В. $\Delta U < 0$.
 Г. ΔU може мати будь-яке значення.
- Д. Внутрішня енергія ідеального газу завжди дорівнює нулю.
3. Який процес відбувся під час стискання ідеального газу, якщо робота, яку виконують зовнішні сили над газом, дорівнює зміні внутрішньої енергії газу?
 А. Адіабатний.
 Б. Ізобарний.
 В. Ізохорний.
 Г. Ізотермічний.
 Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.
4. Газ отримав кількість теплоти 300 Дж, його внутрішня енергія збільшилася на 200 Дж. Яку роботу виконав газ?
 А. 0. Б. 100 Дж. В. 200 Дж. Г. 300 Дж. Д. 500 Дж.
5. Яку роботу виконує газ при переході зі стану 1 у стан 2 (мал. 240)?
 А. 3000. Б. 2000 Дж. В. 1000 Дж. Г. 0. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.
6. Для аналізу ізотермічного ($T = \text{const}$), ізобарного ($p = \text{const}$) та ізохорного ($V = \text{const}$) процесів використовують рівняння першого начала термодинаміки $\Delta U = A + Q$. Кількість теплоти, яка передається системі, при ізобарному процесі...
 А. Повністю використовується на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U$, тому що $\Delta V = 0$ і $p\Delta V = 0$. Б. Частково витрачається на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U + p\Delta V$. В. Повністю перетворюється на роботу розширення: $Q = A$, тому що $\Delta U = 0$. Г. Не підводиться, а робота виконується за рахунок внутрішньої енергії газу: $A = -\Delta U$. Д. Не можна перевести від більш холодної системи до більш гарячої при відсутності в ній інших одночасних змін.
7. Оцініть максимальне значення ККД, який може мати теплова машина, температура нагрівника якої 227°C , а температура холодильника 27°C .
 А. 100 %. Б. 88 %. В. 60 %. Г. 40 %. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.
8. Який із виразів справедливий для холодильної машини?
 А. $Q_1 = Q_2$. Б. $Q_1 < Q_2$. В. $Q_1 > Q_2$. Г. $Q_1 \leq Q_2$. Д. Серед відповідей А—Г правильної немає.

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТІЛА, КИНУТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Мета роботи: виміряти початкову швидкість, надану тілу в горизонтальному напрямі при його русі під дією сили тяжіння.

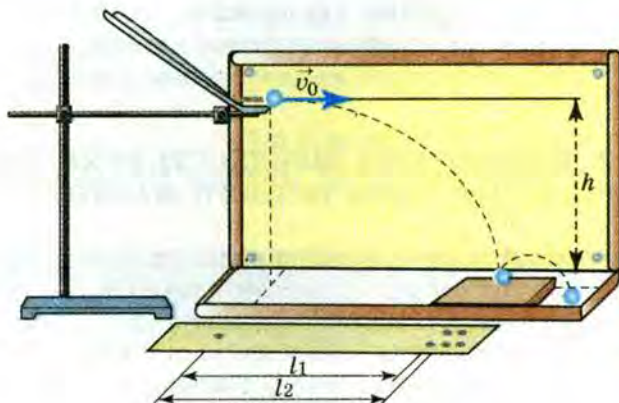
Якщо кульку кинуть горизонтально, то вона рухається по параболі. За початок координат візьмемо початкове положення кульки. Напрямимо вісь Ox горизонтально, а вісь Oy — вертикально вниз. Тоді у будь-який момент часу t $x = v_0 t$, а $y = \frac{gt^2}{2}$. Дальність польоту l — це значення координати x , яке вона матиме, якщо замість t підставити час падіння тіла з висоти h . Тому можна записати: $l = v_0 t$; $h = \frac{gt^2}{2}$. Звідси легко визначити час падіння t і початкову швидкість руху тіла v_0 : $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ і $v_0 = \frac{l}{t}$ або $v_0 = l \sqrt{\frac{g}{2h}}$.

Якщо пускати кульку в незмінних умовах досліду кілька разів (мал. 241), то значення дальності польоту матимуть деякий розкид через вплив різних причин, що неможливо врахувати. У таких випадках за значення вимірюваної величини береться середнє арифметичне результатів, отриманих в кількох дослідах.

Прилади і матеріали: лінійка з міліметровими поділками, штатив з муфтою і лапкою, жолоб для пуску кульки, фанерна дошка, кулька, папір, кнопки, копіювальний папір.

Хід роботи

1. За допомогою штатива закріпіть фанерну дошку вертикально. При цьому тією ж лапкою затисніть виступ жолоба. Загнутий кінець жолоба повинен бути горизонтальним (мал. 241).



Мал. 241

2. Прикріпіть до фанери кнопками лист паперу шириною не менше ніж 20 см і біля підставки установки на смужку білого паперу покладіть копіювальний папір.

3. Повторіть дослід п'ять разів, пускаючи кульку з одного і того самого місця жолоба, приборіть копіювальний папір.

4. Виміряйте висоту h і дальність польоту. Результати вимірювання занесіть у таблицю.

5. Розрахуйте середнє значення дальності польоту $l_{\text{сер}}$.

6. Визначте початкову швидкість руху кульки, абсолютну і відносну похибки вимірювань: $v_{0 \text{ сер}} = l_{\text{сер}} \sqrt{\frac{g}{2h}}$; $\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta g}{g} + \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h}$; $\Delta v_{\text{сер}} = \varepsilon v_{\text{сер}}$. Якщо величину g округлити до $9,8 \text{ м/с}^2$, то $\varepsilon_g \approx 0,002$, і нею в розрахунках можна знехтувати.

Результати занесіть у зошиті в таблицю:

Номер досліду	h , м	Δh , м	l , м	Δl , м	$l_{\text{сер}}$, м	$\Delta l_{\text{сер}}$, м	Δg , м/с ²	v , м/с	$v_{\text{сер}}$, м/с	$\Delta v_{\text{сер}}$, м/с	ε , %
1											
2											
3											
4											
5											

7. Користуючись формулами $x = v_{0 \text{ сер}} t$ і $y = \frac{gt^2}{2}$, визначте координату x тіла через кожні 0,05 с і побудуйте траєкторію руху на аркуші паперу, прикріпленому до фанерної дошки:

t , с	0	0,05	0,10	0,15	0,20
x , м	0				
y , м	0	0,012	0,049	0,110	0,190

8. Зробіть висновки.

РОБОТА 2. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: у даній роботі потрібно визначити методом балістичного маятника швидкість руху кинутого горизонтально тіла.

Для цього треба зібрати установку, показану на мал. 242.

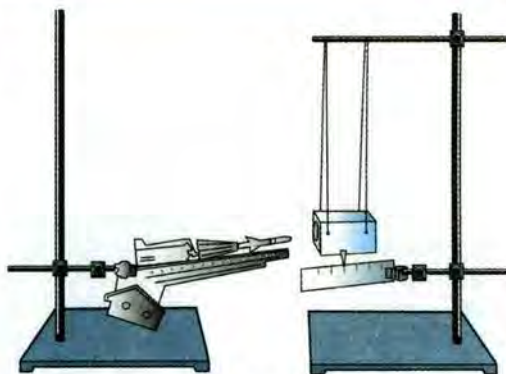
За допомогою лапки штатива «ракетну установку» або іншу подібну іграшку закріплюють у горизонтальному положенні точно проти отвору в коробці, підвішеній на довгих нитках, як маятник. Снаряд перед проведенням досліду надягають на стержень зі спіральною пружиною. При цьому пружина стискається і снаряд закріплюється спеціальною заціпкою.

Потім роблять постріл. Снаряд застряє в коробці, надаючи їй імпульсу. За законом збереження імпульсу можна записати:

$$mv = (M + m)u,$$

де m — маса снаряда; v — швидкість руху снаряда; M — маса коробки; u — швидкість руху коробки із застрягим в ній снарядом.

Якщо маси снаряда і коробки відомі (їх вимірюють шляхом зважування), то для визначення швидкості снаряда v необхідно знати швидкість руху коробки u після попадання у неї снаряда:



Мал. 242

$$v = \frac{(M+m)}{m}u.$$

Застосовуючи закон збереження енергії, можна швидкість коробки виразити через максимальну висоту її підняття h відносно початкового рівня (мал. 243, а):

$$\frac{(M+m)u^2}{2} = (M+m)gh,$$

звідки $u = \sqrt{2gh}$.

Висоту підняття h можна визначити, вимірявши довжину підвісу l і хорду AB (мал. 243, б): $h = \frac{s^2}{2l}$.

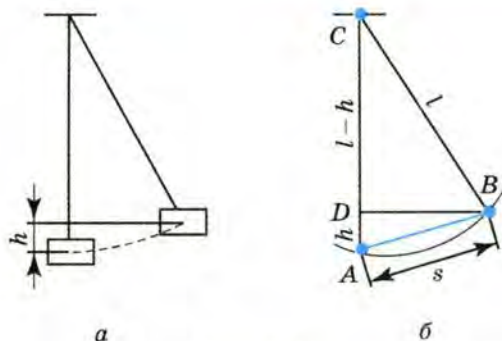
$$\text{Тоді } v = \frac{(M+m)}{m} \sqrt{2g \frac{s^2}{2l}} = \frac{(M+m)}{m} s \sqrt{\frac{g}{2l}}.$$

Прилади і матеріали: балістичний маятник (коробка, підвішена на штативі), іграшка «ракетна установка» або інша подібна іграшка, штатив лабораторний, лінійка з міліметровими поділками, терези, набір важків.

Хід роботи

1. Підготуйте у зошиті таблицю для запису результатів вимірювань і розрахунків:

Номер досліду	m , кг	Δm , кг	M , кг	ΔM , кг	s , м	$s_{\text{сер}}$, м	$\Delta s_{\text{сер}}$, м	h , м	Δh , м	l , м	Δl , м	v , м/с	Δv , м/с	ε , %
1														
2														
3														



Мал. 243

2. За допомогою терезів визначте масу снаряда і коробки (m, M), а рулеткою — довжину нитки підвісу l . Результати вимірювань занесіть у таблицю.

3. Зробіть 3—5 пострілів, вимірюючи кожного разу значення відхилення балістичного маятника s . Визначте середнє значення відхилення $s_{\text{сеп}}$.

4. Визначте швидкість руху снаряда v .

5. Отримані результати занесіть у таблицю.

6. Обчисліть абсолютну і відносну похибки вимірювань:

$$\varepsilon = \frac{\Delta M + \Delta m}{M + m} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta s_{\text{сеп}}}{s_{\text{сеп}}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta g}{g} + \frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l}; \Delta v = \varepsilon v.$$

Якщо величину g округлити до $9,8 \text{ м/с}^2$, то $\varepsilon_g \approx 0,002$, і нею в розрахунках можна знехтувати.

7. Зробіть висновки.

Для допитливих

1. Поясніть принцип дії даної установки для визначення швидкості руху снаряда.

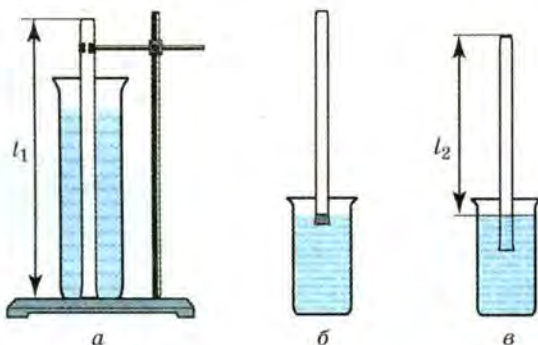
2. Чому для знаходження швидкості снаряда балістичного маятника не використовується такий спосіб обчислень:

$$\frac{mv^2}{2} = (M + m)gh \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2(m + M)gh}{m}}$$

РОБОТА 3. ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ГЕЙ-ЛЮССАКА

Мета роботи: на дослідах перевірити закон Гей-Люссака.

Щоб перевірити закон Гей-Люссака, потрібно виміряти об'єм і температуру газу в двох станах при сталому тиску і перевірити справедливність



Мал. 244

рівності $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Це можна зробити, використовуючи повітря при атмосферному тиску.

Скляну трубку вставляють на 3—5 хв відкритим кінцем вгору в циліндричну посудину з гарячою водою (мал. 244, а). У цьому випадку об'єм повітря V_1 дорівнює об'єму скляної трубки, а температура — температурі гарячої води T_1 . Це — перший стан. Щоб під час переходу повітря в другий стан його кількість не змінилася, відкритий кінець скляної трубки, що знаходиться у гарячій воді, замазують пластиліном або закривають корком. Після цього трубку виймають з посудини з гарячою водою і замазаний або закритий кінець швидко опускають у склянку з водою кімнатної температури (мал. 244, б), а потім під водою знімають пластилін або корок. У міру охолодження повітря у трубці вода в ній піднімається. Після припинення піднімання води в трубці (мал. 244, в) об'єм повітря в ній дорівнюватиме $V_2 < V_1$, а тиск $p = p_{\text{атм}} + \rho gh$. Щоб тиск повітря у трубці знову дорівнював атмосферному, потрібно збільшити глибину занурення трубки в склянку доти, доки рівні води в трубці й у склянці не будуть однаковими. Це буде другий стан повітря в трубці при температурі навколишнього повітря T_2 . Відношення об'ємів повітря в трубці в першому і другому станах можна замінити відношенням висот повітряних стовпів у трубці у цих станах, якщо переріз трубки однаковий по всій довжині $\left(\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}\right)$. Тому в роботі слід зрівняти відношення $\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Довжину повітряного стовпа вимірюємо лінійкою з міліметровими поділками, а температуру — термометром.

Прилади і матеріали: скляна трубка довжиною 600 мм і діаметром 8—10 мм, запаяна з одного кінця, посудина висотою 600 мм і діаметром 40—50 мм, наповнена гарячою водою ($\approx 60^\circ\text{C}$), склянка з водою кімнатної температури, лінійка з міліметровими поділками, пластилін або корок.

Хід роботи

1. Підготуйте у зошиті таблицю для записування результатів вимірювань і обчислень:

l_1 , мм	l_2 , мм	Δl , мм	t_1 , °C	T_1 , К	t_2 , °C	T_2 , К	ΔT , К	$\frac{l_1}{l_2}$	Δ_1	ε_1 , %	$\frac{T_1}{T_2}$	Δ_2	ε_2 , %

2. Підготуйте склянку з водою кімнатної температури і посудину з гарячою водою.

3. Виміряйте довжину l_1 скляної трубки і температуру води у циліндричній посудині T_1 .

4. Приведіть повітря в трубці у другий стан так, як про це розповідалося вище. Виміряйте довжину l_2 повітряного стовпа в трубці і температуру навколишнього повітря T_2 .

5. Обчисліть відношення $\frac{l_1}{l_2}$ і $\frac{T_1}{T_2}$, відносні та абсолютні похибки вимірювань цих відношень за формулами: $\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}$; $\Delta_1 = \frac{l_1}{l_2} \varepsilon_1$; $\varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}$; $\Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \varepsilon_2$.

6. Порівняйте відношення $\frac{l_1}{l_2}$ і $\frac{T_1}{T_2}$ і зробіть висновок про справедливість закону Гей-Люссака.

Для допитливих

1. Чому після занурення трубки у склянку з водою кімнатної температури і після зняття пластиліну вода у трубці піднімається?

2. Чому у випадку, коли рівні води у склянці і в трубці однакові, тиск повітря в трубці дорівнює атмосферному?

РОБОТА 4. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ВОДИ

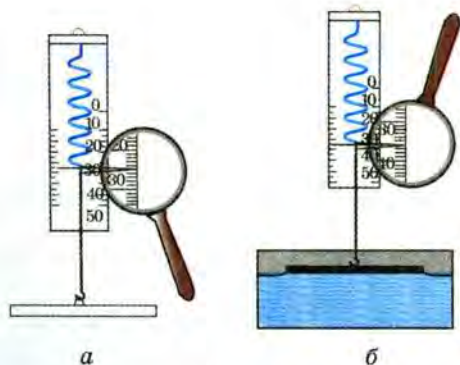
Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу найзручніше користуватися співвідношенням між силою поверхневого натягу і довжиною межі поверхневого шару $F = \sigma l$.

Прилади і матеріали: динамометр, склянка, штангенциркуль або вимірювальна лінійка з міліметровими поділками, дротик або дротяна рамка на нитках (мал. 245).



Мал. 245



Мал. 246

Хід роботи

1. Виміряйте штангенциркулем або масштабною лінійкою довжину дротика (периметр рамки).

2. Прикріпіть дротик або рамку до гачка динамометра і розташуйте в строго горизонтальному положенні (мал. 246, а).

3. Обережно опустіть дротик або рамку так, щоб вони, торкнувшись поверхні води, «прилипили» до неї.

4. Підніміть вгору динамометр, прослідкуйте, при якому значенні дрітик або рамка «відірветься» від води (мал. 246, б).

5. Повторіть дослід п'ять разів і заповніть у зошиті таблицю:

Номер досліду	l , м	Δl , м	F , Н	$F_{\text{ср}}$, Н	ΔF , Н	σ , Н/м	$\Delta\sigma$, Н/м	ε , %
1								
2								
3								
4								
5								

6. Обчисліть середнє значення сили, що діє на дрітик або рамку.

7. За формулою визначте коефіцієнт поверхневого натягу води: $\sigma = \frac{F}{l}$.

8. Розрахуйте абсолютну і відносну похибки вимірювання: $\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l}{l}$;

$$\Delta\sigma = \varepsilon\sigma.$$

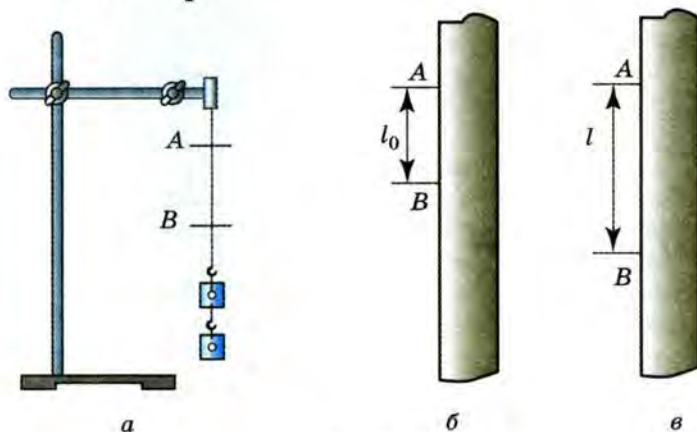
9. Зробіть висновки.

РОБОТА 5. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ (МОДУЛЯ ЮНГА) ГУМИ

Мета роботи: визначити модуль пружності (модуль Юнга) гуми.

Модуль Юнга обчислюють за формулою $E = \frac{Fl_0}{S(l-l_0)}$, яку вивели із закону

Гука, де E — модуль Юнга; F — сила пружності, що виникає у розтягнутому шнурі і яка дорівнює вазі прикріплених до шнура важків (мал. 247, а); S — площа поперечного перерізу деформованого шнура; l_0 — відстань між позначками А і В на нерозтягнутому шнурі (мал. 247, б); l — відстань між цими самими позначками на розтягнутому шнурі (мал. 247, в). Якщо поперечний переріз шнура має форму круга, то площа перерізу виражається через діаметр шнура: $S = \frac{\pi D^2}{4}$.



Мал. 247

Остаточно формула для визначення модуля Юнга має вигляд

$$E = \frac{4Fl_0}{\pi D^2(l-l_0)}$$

Вагу важків визначаємо динамометром, діаметр шнура — штангенциркулем, відстань між позначками A і B — лінійкою. Відносну й абсолютну похибки вимірювання модуля Юнга визначають за формулами

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l}{l_0} + 2 \frac{\Delta D}{D} + 2 \frac{\Delta l}{l-l_0}; \Delta E = \varepsilon E.$$

Похибкою $\pi = 3,14$ можна знехтувати.

Прилади і матеріали: штатив з лапкою, гумовий шнур, олівець, міліметрова лінійка, динамометр, набір важків.

Хід роботи

1. Підготуйте у зошиті таблицю для записування результатів вимірювання та обчислень:

l_0 , м	l , м	Δl , м	D , м	ΔD , м	F , Н	ΔF , Н	E , Па	ΔE , Па	ε , %

2. Складіть експериментальну установку.

3. Зробіть олівцем позначки на гумовому шнурі. Виміряйте відстань між позначками A та B на нерозтягнутому шнурі.

4. Визначте загальну вагу важків і підвісьте їх до нижнього кінця шнура. Виміряйте відстань між рисками на шнурі і діаметр шнура у розтягнутому стані.

5. Обчисліть модель Юнга гуми: відносну й абсолютну похибки вимірювання модуля Юнга.

6. Запишіть отриманий результат: $E = E_{\text{зр}} \pm \Delta E$, $\varepsilon = \dots$ %. Порівняйте цей результат із табличним.

Для допитливих

Чому модуль Юнга виражається таким великим числом?

УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

§62 СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ НА ПРОСТІР І ЧАС

Фізика була і залишається сьогодні найбільш розвинутою і систематизованою природничою наукою, сучасна картина світу значною мірою базується саме на її досягненнях, а розвиток фізики безпосередньо пов'язаний з побудовою фізичних картин світу, що змінюють одна одну. При постійному зростанні кількості дослідних даних картина світу тривалий час залишається незмінною. Із зміною фізичної картини світу завжди починається новий етап у розвитку фізики з іншою системою початкових уявлень, принципів, гіпотез і стилю мислення. У фізичній картині світу ключовими є три фундаментальні категорії: уявлення про простір — час, елементарні частинки, з яких побудована матерія, та взаємодії, що з'єднують ці частинки в єдине ціле. Тому зміна фізичної картини світу завжди пов'язана із переглядом цих фундаментальних понять.

Розвиток уявлень про категорії часу і простору в сучасній фізиці відбувається одночасно з переглядом механічної картини світу, тобто із спростуванням концепції Ньютона про час і простір. Так, уже в 1821 р. О. Френель увів поняття так званого ефіру як носія світлових коливань, припускаючи, що ефір — це не порожнеча, але й не речовина. Англійський фізик Д. Максвелл у середині XIX ст. теоретично дав відповідь на такі питання: чи рухається ефір; як узгодити його властивості із властивостями електромагнітного поля. Після кількох десятиліть суперечок між ученими експеримент Майкельсона—Морлі, метою якого було виявити рух ефіру відносно Землі, так і не дав будь-яких певних, значущих результатів.

Досліджуючи проблеми часу і простору, А. Ейнштейн у 1905 р. сформулював свою спеціальну теорію відносності, де відмовлявся від поняття абсолютного спокою. Це означало поширення принципу відносності на електромагнітні явища і призводило до суперечності з головним постулатом — припущенням сталості швидкості світла. Власне цю суперечність і розв'язала концепція Ейнштейна. Він відкрив, що в класичній механіці неадекватно приймався принцип одночасності різних подій як наслідок принципу «далекодії» (поширення подій з миттєвою швидкістю) головного принципу теорії Ньютона. Проте припущення кінцевої швидкості електромагнітних явищ не узгоджувалося з традиційним поняттям одночасності.

Ейнштейн почав досліджувати значення синхронності ходу годинників, розміщених у різних точках простору та нерухомих один відносно одного, на основі принципу близькодії, який впливає з концепції відносності швидкостей і рухів (залежно від конкретної системи відліку). Вчений отримав результати, які доводили відносність протяжності та тривалості (тобто скорочення довжини та «уповільнення» часу). Якщо швидкість частинки зростає за значенням, що наближається до швидкості світла, то її власний час уповільнюється, а просторова протяжність скорочується: **отже, простір і час безпосередньо «вміщуються» у зміст частинки, стають немовби її властивостями.** Так було розкрито змістовність простору і часу, необхідність їх вивчення разом із рухом.

Досліджуючи далі отримані результати, Ейнштейн розробив загальну теорію відносності, яка поширила принцип відносності на будь-які системи, що рухаються. З'ясувалися нові властивості простору, передусім його «кривизна», під впливом сильних гравітаційних полів. Рівняння тяжіння, які вивів Ейнштейн, розкривають сталу, статичну «модель» Всесвіту, тотожну собі. Майже одночасно з Ейнштейном радянський вчений А. А. Фрідман сформулював «динамічну» модель Всесвіту, де речовина рухається під впливом гравітаційних сил. Дійсно, спостереження ефекту «червоного зміщення» кольорового спектра, який вказує на «розбігання» галактик, підтверджує правильність наведених положень Фрідмана. Проте у сучасній космології розглядаються й варіанти нерухомого Всесвіту, хоча більшість астрофізиків додержуються концепції «великого вибуху» — припущення, що близько 16—18 млрд. років тому виникла спостережувана частина Всесвіту, який продовжує «розбігатися» від якогось вірогідного «центра».

Можливість просторової «замкненості» Всесвіту спонукає замислитися над змістом поняття «нескінченність Всесвіту». Тут йдеться не про масштаби простору, а про невичерпність матерії, яка породжує в своєму розвитку нові властивості та якості. Ця проблема є однією з тих, що зближує дослідження мікросвіту із дослідженням Всесвіту. Чим далі ми намагаємося зазирнути у Всесвіт, тим глибше застрягаємо в проблемах мікросвіту.

Дійсно, сучасна фізика елементарних частинок виявляє межі своїх досліджень через «кванти» простору та часу (відстань приблизно $7 \cdot 10^{-17}$ см та інтервал часу приблизно $2 \cdot 10^{-27}$ с). Детальніше заглиблення в мікросвіт відкриває зону загального «кипіння», де зникає різниця між часом та простором. Так, на відстані 10^{-33} см у вакуумі відбуваються такі бурхливі процеси спонтанного народження й перетворення речовини у випромінювання, що простір стає якимось «кипінням» пор-бульб, які утворюються та миттєво зникають. На сьогодні у фізиці найменші «кванти» простору досягають інтервалів 10^{-33} см.

Величезна роль «мікропростору» та «мікрочасу» для вивчення елементарних частинок, структури атома тощо. Приблизно в середині ХХ ст. було доведено, що врахування координат простору—часу дає важливу інформацію про внутрішню структуру частинок і зони їхньої взаємодії. Фізики спробували також обґрунтувати твердження про те, що простір матеріальних взаємодій є тривимірним. Виявляється, що лише у тривимірному просторі можливе розв'язання хвильового рівняння у вигляді сферичної хвилі. У п'ятивимірному або семивимірному уявному світі сферичні хвилі при поширенні неодмінно викривлювалися б, і лише тривимірний простір забезпечує передачу інформації без викривлення, що дуже важливо, насамперед для розвитку живих організмів. Так властивості часу та простору входять у наше знання про Всесвіт та Мікросвіт.

Таким чином, простір і час невіддільні від матерії, тобто вони є її загальними атрибутами. Простір нескінченний і безмежний. Спливання часу теж не має ні початку, ні кінця. Отже, матеріальний світ нескінченний у просторі й вічний у часі.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Назвіть три фундаментальні категорії, на яких побудована фізична картина світу.
2. Чому проблема часу і простору така важлива для фізики?

3. Яке відношення мають такі вчені, як І. Ньютон та А. Ейнштейн до розвитку уявлень про простір і час?
4. У яких межах сучасна фізика елементарних частинок проводить дослідження простору та часу?

§ 63 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК КЛАСИЧНОЇ І РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ МЕХАНІКИ

Розглянемо питання про метод побудови ньютонівської механіки та її місце у фізиці. Узагальнюючи наукові досягнення минулого, І. Ньютон розробив і запровадив у фізиці метод принципів. За цим методом для стрункої побудови механіки як науки формулюється система кількох принципів, на основі яких будується теорія шляхом логічних (математичних) висновків.

У механіці такими принципами є закони Ньютона. Додатково вводяться також фізичні абстракції, ідеалізації, моделі, наукові поняття, величини.

Обґрунтування принципів має дослідний, а не логічний характер, тобто дається практикою. Принципи підтверджуються не стільки безпосередньою їх перевіркою, скільки відповідністю теорії практиці.

Дослід — категорія історична: він постійно збагачується, розвивається. Так, практика XVII, XVIII, XIX ст. цілком підтверджувала принципи (закони) Ньютона. Пізніше, коли коло досліджуваних явищ значно розширилось і точність вимірювання набагато підвищилась, було виявлено нові матеріальні об'єкти і нові умови їх руху, для яких ньютонівська механіка як теорія руху не підтверджувалась.

Тоді в науці й почався пошук таких принципів, які задовольняли б набутий досвід нового, вищого рівня. Так було при побудові спеціальної теорії відносності на початку нашого століття і пізніше при побудові квантової механіки у 20-х роках XX ст.

Яка ж доля старих принципів після появи нових? Вони залишаються правильними в межах застосування старої теорії. З появою нових принципів і відповідних теорій відбувається лише уточнення тієї сфери, в якій застосовна стара теорія. Виявилось, що класична ньютонівська механіка зберігає своє значення і є правильною для руху макроскопічних тіл за умови, що їх швидкість значно менша за швидкість світла у вакуумі. Макроскопічні тіла — це тіла, що складаються з величезної кількості молекул. Так, динаміка космічних польотів будується на основі принципів Ньютона: космічні швидкості ще занадто малі порівняно зі швидкістю світла.

Отже, з появою нових теорій (релятивістської і квантової механіки) механіку Ньютона не було відкинуто, а лише уточнено межі її застосування. Нові теорії містять у собі ньютонівську механіку як наближений граничний випадок: наука розвивається за так званим принципом відповідності. Можна стверджувати, що механіка Ньютона і в майбутньому ніколи не втратить свого наукового і прикладного значення, завжди займатиме місце, яке їй по праву належить тепер.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Використовуючи різноманітні джерела, прослідкуйте, як розвивалася класична і релятивістська механіка.

ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ НАВКОЛО НАС

1. Пліт пливе за течією річки. Який його рух відносно води? берега річки?
2. Чи можна застосовувати вітрила і стерно для керування польотом повітряної кулі?
3. Стрічковий транспортер рухається зі швидкістю 16 см/с. За який час вантаж переміститься за допомогою транспортера на 24 м?
4. Ліфт рівномірно піднімається зі швидкістю 3 м/с. Яку відстань він подолає за 0,5 хв?
5. У якому випадку предмет, що випав з вікна вагона, впаде на Землю раніше: коли вагон стоїть на місці чи коли він рухається?
6. По річці пливе човен і поруч з ним пліт. Що легше для весляра: перегнати пліт на 5 м чи на стільки ж відстати від нього?
7. З якою швидкістю і в якому напрямі має летіти літак по шістдесятій паралелі, щоб прибути в пункт призначення раніше (за місцевим часом), ніж він вилетів з пункту відправлення? Чи можливо це для сучасних пасажирських літаків?
8. Перша у світі орбітальна космічна станція, утворена внаслідок стикування космічних кораблів «Союз-4» і «Союз-5» 16 січня 1969 року, мала період обертання 88,85 хв і середню висоту над поверхнею Землі 230 км (вважаючи, що орбіта колова). Визначити середню швидкість руху станції.
9. Діаметр колеса велосипеда «Пенза» $d = 70$ см, ведуча шестерня має 48 зубців, а ведена — 18 зубців. З якою швидкістю рухається велосипедист на цьому велосипеді при частоті обертання педалей 1 об/с? З якою швидкістю рухається велосипедист на складному велосипеді «Кама» (мал. 248) при тій самій частоті обертання педалей, якщо в цього велосипеда $d = 50$ см, ведуча шестерня має 48 зубців, а ведена — 15 зубців?
10. Кругла пилка має діаметр 600 мм. На вісь пилки насаджено шків діаметром 300 мм, який приводиться в обертання за допомогою пасової передачі від шків діаметром 120 мм, насадженого на вал електродвигуна. Яка швидкість зубів пилки, якщо вал електродвигуна робить 1200 об/хв?
11. Чому важко забивати цвяхи в хиткий паркан?
12. Чому важко стрибнути на берег із легкого човна і легко з баржі, що стоїть на такій самій відстані від берега?
13. Чому шафу з книжками дуже важко зрушити з місця?
14. Чому локомотиви не будують з легкого, але міцного сплаву — дюралюмінію?



Мал. 248

15. Чому транспортні машини іноді буксують?
16. Чому ми не помічаємо притягання між тілами, що нас оточують?
17. Як би рухався Місяць, коли б зникло тяжіння між Місяцем і Землею?
18. Чи зможе космічний корабель летіти у космічному просторі за інерцією прямолінійно?

19. З особистих спостережень установіть, чи можна тілом якої-небудь природи запобігти дії сили всесвітнього тяжіння.

20. На якій відстані від поверхні Землі сила притягання космічного корабля до неї стане в 100 разів меншою, ніж на поверхні Землі?

21. Ствол рушниці й мішень розташовано на одній горизонталі. Одночасно з пострілом мішень починає вільно падати. Чи влучить куля в мішень?

22. Де — на Землі чи на Місяці — більше зміститься тіло по горизонталі, якщо його кидати горизонтально з однакової висоти з рівними за модулем швидкостями?

23. У якому випадку (за інших однакових умов) дальність польоту списа буде більша: а) металник кидає спис зі стану спокою; б) металник кидає спис з розгону? Чому?

24. Вага тіла зменшується з підняттям над Землею. Чи збільшиться вага тіла, якщо його наблизити до центра Землі, наприклад, опустити тіло на дно глибокої шахти?

25. Людина, маса якої дорівнює 70 кг, перебуває в ліфті. Визначте вагу людини: 1) перед початком піднімання; 2) на початку піднімання з прискоренням 3 м/с^2 ; 3) під час руху із сталою швидкістю 5 м/с .

26. Фобос і Деймос — два природних супутники Марса (мал. 249). Фобос обертається ближче до центра планети, Деймос — далі. У кого з них більша швидкість обертання навколо планети? Орбіти супутників майже колові.

27. Як встановили в 1895 р. А. А. Белопольський (Росія) і Д. Кілер (США), кільце Сатурна (мал. 250) складається з безлічі дрібних частинок, які незалежно обертаються навколо планети. Як змінюються швидкості обертання частинок по радіусу кільця в напрямі від його внутрішньої частини до зовнішньої?

28. Чи має вагу качка, що летить? А чи має вагу та, що падає: а) у повітрі; б) вільно? Якщо мають, то чи однакова їхня вага? Якщо неоднакова, то на скільки розрізняється?

29. У космічному кораблі сірник запалюється і відразу гасне. Чому?

30. Астронавти здійснюють у космічному кораблі мандрівку із Землі на Місяць. Протягом якого часу вони перебувають у стані невагомості?

31. З якою швидкістю має їхати велосипедист по середній частині опуклого моста з радіусом кривизни 10 м , щоб не чинити тиску на міст?



Мал. 249



Мал. 250



Мал. 251

32. На скільки видовжиться риболовна волосінь із жорсткістю $0,5 \text{ кН/м}$ під час піднімання вертикально вгору рибини масою 200 г ?

33. Якої природи сили штовхають снаряд усередині ствола гармати?

34. Візьміть стос із декількох книг з однаковими обкладинками і спробуйте витягнути з нього одну з книг, не чіпаючи інших. Які книги почнуть рухатися і чому?

35. Чому великій крижині, що плаває на воді, надати руху легко, а відразу надати великої швидкості важко?

36. Якщо припинити гребти веслами, човен швидко зупиняється. Чому? Навіщо спортивні човни полірують?

37. Чому легше пливти, ніж бігти по дну, перебуваючи по пояс у воді?

38. Краплина дощу, падаючи з великої висоти, випаровується. Як впливає це випаровування на рух краплини?

39. Для чого під час стрільання з рушниці (мал. 251) рекомендується дужче притиснути приклад до плеча?

40. Чому молотком можна розбити камінь на долоні, не відчувши болю від удару?

41. Чому під час прополювання бур'яни не слід виривати із землі дуже швидко?

42. Крапля дощу масою 1 г упала з висоти 1 км . Визначте роботу сили тяжіння.



Мал. 252

43. Супутник рухається по коловій орбіті. Чи мають потенціальну енергію предмети в кабіні супутника відносно кабіні? Відносно Землі?

44. Спортсмен підкинув м'яча вертикально вгору і зловив його, коли той падав униз. Як перетворювалася енергія м'яча?

45. З яких видів механічної енергії складається повна енергія штучного супутника Землі?

46. При вивченні дорожньої пригоди було встановлено, що довжина сліду загальмованих коліс автомобіля становила 25 м . З якою швидкістю рухався автомобіль до гальмування, якщо коефіцієнт тертя коліс по поверхні дороги $0,3$?

47. Парашутист рівномірно спускається на парашуті (мал. 252). Його кінетична енергія стала, а по-

тенціальна — весь час зменшується. Чи не порушується тут закон збереження енергії?

48. Для запобігання кесонної хвороби (закупорка кровоносних судин) водолаза слід піднімати на поверхню дуже повільно. Наприклад, після доби, проведеної на глибині 170 м, піднімання повинне тривати, у крайньому випадку, 7 діб. Визначте середню швидкість піднімання водолаза. Піднімання вважати рівномірним.



Мал. 253

49. Як показали випробування допоміжної гальмівної системи автомобіля (вмикається електромагнітне гальмо), при її паралельному використанні зі звичайним ножним гальмом запізнення спрацювання гальмівної системи скорочується від 0,5 до 0,15 с. Визначте скорочення гальмівного шляху при швидкості руху 100 км/год.

50. Медоносна бджола літає за нектаром на відстань до 2,25 км (мал. 253). Щоб зібрати 400 г меду, вона повинна здійснити до 80 000 польотів. Порівняйте відстань, яку пролітає бджола, з довжиною земного екватора.

51. Під час виверження індонезійського вулкану Кракатау (27 серпня 1883 р.) повітряна хвиля поширилася зі швидкістю звуку і тричі обігнула Землю (мал. 254). Інша хвиля — цунамі — здійснила кругосвітню подорож зі швидкістю 566 км/год. Швидкість поширення звуку в повітрі 340 м/с. Визначте відношення часу поширення повітряної хвилі до часу руху хвилі в океані.

52. Як повинен повести себе водій: зупинитися чи проїхати на жовте світло світлофора, якщо встановлені такі параметри: автомобіль рухається з допустимою швидкістю 15 м/с, максимальне прискорення 3 м/с^2 , ширина перехрестя 10 м, жовте світло горить 2 с?

53. Чи можна користуватися пісочним і наручним годинниками в стані невагомості?

54. Маса літаючої риби 0,51 кг. Її політ у повітрі за інерцією на відстань до 30 м триває 2 с. Визначте кінетичну енергію в момент польоту риби над водою на висоті до 10 м. Політ риби вважати рівномірним.

55. Під час потужного землетрусу енергія ударної хвилі, за розрахунками вчених, досягає в епіцентрі до 10^{18} Дж. Розрахуйте, скільки років довелося б працювати гідрогенератору потужністю 10^8 Вт, щоб виробити таку саму кількість енергії.

56. Чому при шліфуванні поверхонь тертя зменшується лише до певної межі, а при дальшому шліфуванні — збільшується?

57. Вага повітря зумовлює атмосферний тиск. Як саме підтримується нормальний тиск у кабіні космічного корабля, коли повітря в кабіні невагоме?

58. Окрема клітина людського нерва може витягуватися до 1 м. Її діаметр у середньому дорівнює 10^{-4} см. Кожний з атомів, який



Мал. 254



Мал. 255

входить до складу клітини, займає об'єм $3 \cdot 10^{-23}$ см³. Скільки атомів міститься в такій клітині?

59. Червоні кров'яні тільця крові людини мають діаметр приблизно $7 \cdot 10^{-6}$ м і товщину 10^{-6} м. У 1 мм³ крові їх міститься $5 \cdot 10^6$. У тілі людини 5 л крові. Маса молекули гемоглобіну становить приблизно $1,9 \cdot 10^{-21}$ г, а густина гемоглобіну 1 г/см³. Скільки червоних кров'яних тілець і молекул

гемоглобіну міститься в крові людини?

60. На деталь, площа поверхні якої 20 см², нанесено шар срібла, товщиною 1 мкм. Скільки атомів срібла міститься в покритті?

61. Маса повітря, що надходить до легень теляти за один вдих, $3,5 \cdot 10^{-4}$ кг, а його об'єм 0,3 л. Чому дорівнює тиск у легенях теляти, якщо його температура 36,7 °С?

62. Яка приблизна маса повітря у вашій класній кімнаті при температурі 20 °С і нормальному атмосферному тиску? Молярна маса повітря 0,029 кг/моль.

63. Час пробігу реактивного літака по злітній смугі аеродрому з підвищенням температури навколишнього повітря збільшується (мал. 255). Як це пояснити?

64. Чому в гаражі шини коліс автомобіля накачують узимку до більшого тиску, ніж улітку?

65. Чому пітніють окуляри, коли людина з морозу заходить до кімнати?

66. Чому волейбольна сітка дуже натягується після дощу?

67. Чому крапля спирту розтікається по склу, а крапля ртуті набирає форму кулі?

68. Чи утворюється роса у вітряну погоду?

69. Чому сильну спеку важче перенести при високій вологості повітря?

70. Відомо, що випадки захворювання частіше всього бувають взимку при вологості 20—30 %. А при тій самій температурі, але більш високій відносній вологості — рідше. Чим це пояснюється?

71. Чи можна на Марсі зварити яйце «вкруту»?

72. У якому з капілярів — вузькому чи широкому — стовпчик рідини встановиться вище, якщо рідина змочує капіляр?

73. У якому з капілярів — вузькому чи широкому — стовпчик рідини встановиться вище, якщо рідина не змочує капіляр?

74. Чому брезентовий намет добре захищає від дощу?

75. Гніт лампи, опущений у гас, горить безперервно. Чим це пояснюється?

76. Якщо капіляром доторкнутися до поверхні води, він повністю заповнюється. Чи буде вода бити фонтаном, якщо розламати капіляр навпіл?

77. Личинки комарів, які розвиваються у воді, підвішуються знизу до поверхневої плівки води. Чи зміняться умови підвішування, якщо поверхню води залити тонким шаром нафти?

78. Чим пояснюється хмарка туману, яка з'являється біля горла пляшки з охолодженим лимонадом після відкриття?

79. Людина, щоб втратити вагу, щоденно протягом 30 хвилин займається фізичними вправами. При цьому вона витрачає додатково потужність 232,5 Вт. Раціон харчування людина не змінює. На скільки зменшиться маса людини за тиждень?

80. Чому куб з монокристала під час нагрівання може перетворитися на паралелепіпед?

81. Чому скло ми називаємо твердим тілом, хоча воно перебуває в аморфному стані?

82. Чим розрізняються за своєю будовою кусок цукру-рафінаду і крупинки цукрового піску?

83. Яких деформацій зазнає деталь під час її обробки на токарному верстаті?

84. У чому виявляється зміцнення металу при пластичних деформаціях? Яке значення має це явище для техніки?

85. На чому ґрунтується використання пружних властивостей твердих тіл в амортизаторах, годинникових пружинах тощо?

86. Чому різець із вуглецевої сталі не можна використовувати при високих швидкостях різання?

87. У чому полягає руйнівна сила морозу на рослини?

88. Чому під час дощу або снігопаду підвищується температура повітря?

89. Як пояснити появу інею, а іноді й льоду на віконному склі взимку? З якого боку скла з'являється іній і чому?

90. У металевому циліндрі газ повільно стиснули поршнем. Чи змінилася внутрішня енергія газу?

91. Чому під час накачування камери велосипедного колеса насос нагрівається?

92. Чи можна здійснити повільний адіабатний процес у скляній колбі, калориметрі, посудині Дьюара?

93. Будь-яка теплова машина складається з трьох основних частин. Назвіть ці частини.

94. Чому в двигуні внутрішнього згоряння такти стискання і робочого ходу (мал. 256) — адіабатні процеси, а такти всмоктування й випускання не є такими?

95. Чому бензин, який надходить до циліндра двигуна внутрішнього згоряння, випаровується в основному не під час такту всмоктування, а під час такту стискання?

96. Чим більше циліндрів у двигуні внутрішнього згоряння, тим менше за розмірами у нього махове колесо. Чому?



Мал. 256

Відповіді до задач і вправ

1. Рівномірний рух — «б»; нерівномірні — «а» і «в».
4. «а», «б» і «г» — можна; «в» і «г» — ні.
5. Може.
8. «а» — так; «б» — ні.
10. Немає тіла відліку.
15. У неділю автобус проїхав більший шлях. Переміщення автобуса в суботу і неділю дорівнювало нулю.
16. Пряму лінію.
17. Шлях і час.
18. 18 000 м.
19. 70 км/год.
22. 7 м; 5 м.
23. 25 с.
24. 50 км/год.
25. Ще через 15 хв; не змінився.
26. 30 км/год, на південний схід.
27. 69 км/год, 106 км/год.
29. 48 км/год.
30. 6 км/год; 3 км/год.
31. 2 км/год; 4 км/год.
32. Через 0,2 год; 1 км.
33. 15 м/с.
34. 13 см/хв.
35. 600 м/с.
36. $\alpha = \pi/2$, $t_{\min} = h/v$, $l = uh/v$,
 $s = h\sqrt{u^2 + u^2}/v$.
37. Через 20 с; 30 м.
40. На 2 м/с.
41. Рівноприскорено.
42. Рівносповільнено.
44. 50 м.
45. 93,75 м.
46. 4 м/с².
47. «г»; «д».
48. Рух рівноприскорений; -10 м/с; 6 м/с²; $v = -10 + 6t$ м/с.
49. 3 м/с; 1 м/с².
50. «а»: 1 — рівномірний рух; 2 — рівноприскорений рух; «б»: 0; 2 м/с²; «в»: 5 с.
51. 4 с.
52. 3,2 м.
53. 14 м/с; 1,4 с.
55. 90 см; 50 см.
57. 50 с.
58. 6 м/с; 3 м/с.
59. 2 м/с; 8 м/с.
60. 14,58 м; 9,9 м/с; 24,58 м.
61. AB — рівноприскорений; BC — рівномірний; 3 м/с²; 0; 12 м/с; 18 м/с.
62. 1 м/с²; 0; -1,5 м/с².
66. 34,54 м.
68. 5 м — 15 м — 25 м — 35 м — 45 м — 55 м.
69. Кінцева швидкість і переміщення першого тіла у 2 рази більші, ніж другого.
71. 2 с; 0,04 с; 0,007 с; 0,0006 с.
72. 45 000 обертів.
73. 3,14 м/с.
74. Частота обертання передніх коліс у 2 рази більша.
75. 1025 м/с; 0,003 м/с².
76. $57,6 \cdot 10^6$ м/с².

77. Не можна.
78. У 2 рази.
79. 10π рад; 0,1 рад/с.
80. 0,628 рад/с; 125,6 рад/с.
81. 5 м/с; 0,5 с.
82. 1,6 об/с.
83. 20.
86. 0,55 м.
88. 20 м/с.
89. Ні.
90. Тіло масою 5 кг.
94. 2 т.
95. Сила опору повітря і сила тяжіння.
97. 40 м/с^2 .
98. 25 т.
99. 5 м/с^2 .
100. 2 500 кг; 90 м.
101. $0,5 \text{ м/с}^2$; 10 с.
102. 1,2 м.
103. 5 кг.
104. Ні.
107. 100 Н.
108. 20 г.
110. Маса тіла — фізична величина, інертність тіла — властивість матерії.
113. 1000 м/с^2 .
114. $1,2 \text{ м/с}^2$.
116. 0,3 Н.
117. 123 456 Н.
119. $3,5 \text{ м/с}^2$.
120. 25 Н.
121. 1,2 м/с.
122. 6 кН; 50 с; 750 м.
127. $1,07 \cdot 10^{-6}$ Н.
128. $3,56 \cdot 10^{22}$ Н.
129. 120 т кожна.
130. $9,9 \cdot 10^{-8}$ Н.
131. $8 \cdot 10^{-8}$ Н.
132. Близько 1 Н.
133. $g = \frac{4}{3} \pi G \rho R = 8,5 \text{ м/с}^2$.
134. 4,99 кг.
135. 44 м; 75 м.
136. Дальність польоту кулі з мисливської рушниці у 1,25 раза більша.
137. 3 м.
139. 19,62 Н; 3,9 Н; 7,7 мН.
140. $0,1 \cdot 10^{-5}$ кг; 0,1 кг; 4,99 кг.
141. 2384,8 Н; 3.
145. У 2,4 раза.
148. $3,8 \text{ м/с}^2$.
149. На відстані 6 земних радіусів від центра Місяця.
150. $\rho = \frac{3\pi}{0,1G\tau^2} = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
151. $T = \pi \sqrt{\frac{2r^3}{Gm}}$.
152. 2 с; 35 м/с.
153. 20 км; 28 км 284 м.
155. 85 хв.
156. 1,6.
157. $\Delta N = 9 \cdot 10^3$ Н.
158. 2 год 42 хв.
159. 8 м/с^2 .
160. 1500 Н; 500 Н.
161. 7,5 км/с.
165. 27 мм.
166. 100 Н.
167. 300 Н/м; 6 мм.
168. 0,45.
169. 1,25 Н.
174. 77 кН.
177. 250 Н/м; 8 см.
178. 500 Н/м.
179. 8 Н/м.
181. 15 Н/м.

182. 0,7 м/с.
 185. 50 Н.
 186. 10 Н.
 188. 10 Н; 260 Н.
 190. У 1,5 раза.
 192. 2 000 т.
 194. 19,86 кН.
 195. 104 Н.
 197. 30°; 1732 Н.
 201. Зміщується центр мас човна і того, хто сидить у ньому.
 207. Конус.
 208. 10 кг · м/с.
 209. 30 000 кг · м/с;
 60 000 кг · м/с.
 210. 0,9 м/с.
 212. 5,3 м/с.
 213. На 5 кг · м/с.
 217. 19 992 кг · м/с; 999,6 кг.
 220. 30 м/с.
 221. -5 м/с.
 223. 20 000 т.
 224. 0,25 м/с; ні.
 225. 9810 Дж.
 226. 2121 Дж.
 227. 50 кДж.
 228. 25,62 Дж.
 229. 0; 15 Дж; -45 Дж.
 230. 0,8 м; 2 м.
 231. 39 Дж.
 232. 2,45 МДж.
 233. 8100 Дж; 1,5 м/с.
 234. 3600 Дж.
 235. 1 Дж.
 236. 1 м.
 237. 400 Дж.
 238. 1004,4 Дж.
 239. 167 м.
 240. 10 м/с.
 241. 3150 Дж.
 243. 1440 Дж.
 244. 45 кДж.
 245. 1414 Дж.
 248. 2 Дж.
 250. -200 Дж; 200 Дж; 200 Дж.
 254. 0,01; 1 Дж.
 255. 60 кДж.
 261. На 557 с.
 262. 0,8 м.
 265. 0,9 с.
 267. 0,02 м.
 270. $4 \cdot 10^{-9}$ м; $2,68 \cdot 10^{-25}$ м³.
 274. $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг.
 275. $2,9 \cdot 10^{-26}$; $4,6 \cdot 10^{-26}$ кг.
 276. 200 молів.
 277. 1,47 м³.
 278. 22 кг.
 280. $5 \cdot 10^5$ Па.
 281. 20700 Па.
 282. $2,76 \cdot 10^{-21}$ Дж.
 283. 3200 Па.
 284. 478 м/с.
 286. 0,2 кг.
 287. $2,1 \cdot 10^6$ Па.
 288. 0,06 м³.
 289. 0,014 кг.
 291. $1,8 \cdot 10^{-3}$ м³.
 292. $3 \cdot 10^9$ Па.
 293. $1,5 \cdot 10^5$ Па.
 294. 3 м³.
 295. 1,9 м³.
 296. $1,74 \cdot 10^5$ Па.
 297. Знизити температуру рідин.
 299. Ні.
 306. 1,06.
 307. 476 м/с.
 311. 7729 К.
 312. 1150 Н.
 314. 0,99 кг/м³.
 316. 0,024 м³.
 319. $4 \cdot 10^5$ Па.

322. У 3 рази.
325. 273 л.
326. $0,29 \cdot 10^5$ Па.
327. $0,83 \cdot 10^5$ Па.
330. 1,8 кг.
332. $1,03 \cdot 10^5$ Па.
333. Волога (пара) конденсується на окулярах.
334. Сухе повітря легше.
338. 62 %.
341. 0,146 м.
343. 800 кг/м^3 .
346. Це пов'язане з явищами змочування і незмочування.
351. $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм.
352. 111 Н
353. $6 \cdot 10^5$ Н.
354. 2,7 мм; $0,5 \cdot 10^{-3}$.
360. 2,33 кПа.
361. Конденсується водяна пара (як продукт згоряння).
370. 0,02 мм.
374. $2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.
375. $9,9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$; $2 \cdot 10^{-4}$; $4,97 \cdot 10^{11}$ Па.
376. 37,4 кДж.
377. 12,5 кДж.
379. 9 МДж.
383. 6 Дж; 4 Дж.
384. 0,2 кДж.
385. 135 кДж.
386. 15 кДж.
388. 800 Вт.
389. Перша.
390. 120 К.
391. 28,8 %.
392. 0,18 кг.
393. 54 дні.
401. 1,6 К.
402. 4,9 кДж.
403. 40 Дж.
404. 320 Дж.
405. 2,4 кДж.
406. 1960 Дж.
407. 18 кДж.
408. $\Delta t = \frac{mgh}{100c}$.
409. 10°C .
410. $4,9 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$.
411. 7,5 г.
412. $12 \cdot 10^{-3}$ Дж.
413. 27,7 км/год.
414. 30 %; 400 К.
415. 24 %; 420 %.

Відповіді до рубрики
«Що я знаю і вмю робити»

Кінематика: 1. 140 м. 2. $v = v_1(t_2 - t_1)/t_2 = 15$ км/год. 3. $\frac{n+1}{n-1}$. 4. 584 м/с.
5. 6,5 с. 8. Лінійна швидкість парової турбіни більша у 5 разів, ніж гідротурбіни, а прискорення – у 200 разів.

Динаміка: 3. Тіло буде рухатися з прискоренням. 4. 20 Н. 5. 0.
10. 1250 Н. 11. $0,4$ м/с²; 10 м/с². 12. У 2 рази. 13. 0,15 м. 14. 0,33 м/с.
15. 10 Дж.

Релятивістська механіка: 4. Зменшується до 1,43 м.

Молекулярна фізика: 1. Атмосферний тиск можна визначити з рівняння (закон Бойля—Маріотта): $p_{\text{атм}} V_1 = (p_{\text{атм}} + p_{\text{атм}}) V_2$. 3. 0,13 кг. 4. $7,1$ кг/м³.
5. 0,004 кг/моль; Гелій. 6. На 58 К. 7. 280 К. 9. 1–2 – ізобарний, 2–3 – ізотермічний. 10. Площі однакові. 12. $12,04 \cdot 10^{23}$. 14. 483 м/с.

Термодинаміка: 1. $A = R(T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3} + T_1)$. 2. $A_1 = 0$; $A_2 = 4p_1 V_1$; $A_3 = -2p_1 V_1$; $\Delta U = 3p_1 V_1$; $\Delta U = 0$; $\Delta U = -3p_1 V_1$; $Q_1 = 3p_1 V_1$; $Q_2 = 4p_1 V_1$; $Q_3 = -5p_1 V_1$. 3. 157 К; 8,8 кДж. 4. 76 К. 6. $7A/2$. 9. 191 Дж.

Відповіді до рубрики «Фізичні задачі навколо нас»

1. Відносно води пліт знаходиться в стані спокою, а відносно берега рухається.
3. 150 с.
4. 90 м.
7. Зі швидкістю понад 834 км/год; зі сходу на захід можливий.
8. 7,8 км/с.
13. Існують сили тертя.
17. По прямій лінії.
18. Ні.
22. На Місяці.
23. З розгону.
25. 1 — 700 Н; 2 — 910 Н; 3 — 700 Н.
27. Збільшуються.
28. Має; «а» має; «б» ні.
30. Коли знаходяться на орбіті.
31. 10 м/с.
32. 4 мм.
36. Існує опір води.
39. Щоб уникнути віддачі.
42. 10 Дж.
43. Ні; так.
45. Потенціальної і кінетичної.
47. Ні.
48. 0,000281 м/с.
49. На 4,8 м.
50. Довжина екватора 40 192 км; бджола пролітає 180 000 км.
52. Повинен зупинитися.
53. Пісочним — ні, наручним — так.
54. 57,4 Дж.
55. 315 років.
61. $1,03 \cdot 10^{-5}$ Па.
64. Це пов'язано зі станом доріг влітку і взимку.
71. Ні.
72. Вузькому.
73. Широкому.
75. Капілярними явищами.
80. Монокристал ізотропний.
82. Структурою.
86. Щоб запобігти руйнуванню.
88. Під час конденсації пари або утворення снігу виділяється тепло.
89. Конденсована пара замерзає. З боку кімнати.
91. Збільшується внутрішня енергія газу за рахунок виконання роботи.
94. Такти стискання і робочого ходу повинні проходити без теплообміну, а інші — ні.

Словник фізичних термінів

Абсолютна похибка Δa — різниця між дійсним значенням вимірюваної величини a та одержаним результатом a_d ; вона дорівнює $\Delta a = |a - a_d|$.

Аморфні тіла — це тіла, які не мають точного порядку в розташуванні атомів.

Анізотропія — залежність фізичних властивостей речовини від напрямку.

Броунівський рух — це тепловий рух частинок у рідині або газі.

Вага тіла — сила \vec{P} , з якою тіло внаслідок його притягання до Землі діє на горизонтальну опору або підвіс.

Відносною похибкою вимірювань ε називається відношення абсолютної похибки до значення вимірюваної величини $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100\%$.

Випаровування — це пароутворення, що відбувається з вільної поверхні рідини.

Вільне падіння тіла — це рух тіла лише під дією притягання Землі без інших сторонніх впливів на нього.

Вологість повітря:

— **абсолютна** — кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря;

— **максимальна** — кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря у стані насичення (при точці роси);

— **відносна** — відношення абсолютної вологості повітря ρ до його максимальної вологості ρ_n при даній температурі: $\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%$;

— **відносна φ** — відношення парціального тиску p водяної пари, яка є у повітрі при даній температурі, до тиску p_n насиченої пари при тій самій температурі: $\varphi = \frac{p}{p_n} 100\%$.

Газові закони — кількісні залежності між двома термодинамічними параметрами газу при фіксованому значенні третього параметра.

Гравітаційна взаємодія — взаємодія, властива всім тілам Всесвіту і яка виявляється в їх взаємному притяганні одне до одного. Саме явище всевітнього тяжіння називається гравітацією (з латинської *gravitas* — тяжкість).

Границя пружності $\sigma_{пр}$ — найбільша механічна напруга, при якій деформації тіла залишаються пружними.

Границя текучості — механічна напруга, при якій виникає явище текучості твердого тіла.

Деформація:

— **пружна** — деформація, яка повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил;

— **пластична** — деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішніх сил;

— **розтягу** — збільшення довжини тіла (стержня) при дії на нього двох рівних за модулем, але протилежних за напрямом сил;

— **стиску** — зменшення довжини тіла під дією двох рівних за значенням і напрямлених назустріч одна одній сил;

— **зсуву** — зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох паралельних, але протилежно напрямлених сил;

— **кручення** — поворот паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох сил;

— **поперечного згину** — згинання (вигинання) тіла під дією сили, напрямленої перпендикулярно до його осі.

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

Дифузія — процес взаємного проникнення частинок однієї речовини у міжмолекулярні проміжки іншої без дії зовнішніх сил.

Другий закон Ньютона:

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

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

Енергією поступального руху називають таку механічну величину, яка однакова для усіх тіл, що починають рухатися внаслідок однакової зміни якої-небудь іншої форми руху.

Закон:

— **Бойля—Мариотта:** для даної маси газу добуток тиску газу і його об'єму сталий, якщо температура газу не змінюється: $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$ і $m = \text{const}$.

— **Гей-Люссака:** для даної маси газу відношення об'єму до температури стало, якщо тиск газу не змінюється: $\frac{V}{T} = \text{const}$ при $p = \text{const}$ і $m = \text{const}$.

— **Шарля:** для даної маси газу відношення тиску до температури стало, якщо об'єм газу не змінюється: $\frac{p}{T} = \text{const}$ при $V = \text{const}$ і $m = \text{const}$.

Закон всесвітнього тяжіння: сила гравітаційного притягання будь-яких двох частинок прямо пропорційна добутку їх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Закон Гука: сила пружності пропорційна абсолютній деформації і напрямлена протилежно силі, що деформує тіло.

Закон збереження енергії: повна механічна енергія системи тіл, що взаємодіють між собою без впливу зовнішніх сил, залишається сталою: $E = E_k + E_n = \text{const}$.

Закон збереження імпульсу: геометрична сума імпульсів тіл, що є складовими замкнутої системи, залишається сталою при будь-яких взаємодіях тіл цієї системи між собою.

Змочування — це явище, яке виникає внаслідок взаємодії молекул рідини з молекулами твердих тіл і зумовлює викривлення поверхні рідини біля поверхні твердого тіла.

Запас міцності — число, яке показує, у скільки разів границя міцності більша за допустиму напругу: $\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_d}$.

Ідеальний газ — це газ, взаємодія між молекулами якого така мала, що нею можна знехтувати.

Ізотропність — незалежність фізичних властивостей речовини від напрямку.

Імпульсом тіла або кількістю руху тіла називають добуток маси тіла і швидкості його руху.

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.

Інерціальні системи відліку — системи відліку, в яких виконується закон інерції.

Кипіння — процес пароутворення, що відбувається в об'ємі всієї рідини.

Кількість речовини (позначається літерою ν (ню)) — величина, яка визначається відношенням числа структурних елементів N , з яких складається дане тіло, до кількості атомів N_A , що містяться в одному молі Карбону.

Кінематика — розділ механіки, в якому вивчаються рухи матеріальних тіл без урахування їх мас і сил, що на них діють.

Коефіцієнт поверхневого натягу — величина, що вимірюється силою поверхневого натягу, яка діє на кожну одиницю довжини контуру, що обмежує вільну поверхню рідини: $\sigma = \frac{F}{l}$.

Конденсація — процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий.

Маса:

— **атомна маса** — маса атома, виміряна в атомних одиницях маси;

— **молекулярна маса** — маса молекули, виміряна в атомних одиницях маси.

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

Механіка — розділ фізики, в якому пояснюється механічний рух матеріальних тіл і взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами.

Молекулярно-кінетична теорія — теорія, яка пояснює теплові явища в макроскопічних тілах і внутрішні властивості цих тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично.

Механічна напруга — величина, що вимірюється силою внутрішньої напруги, яка діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла: $\sigma = \frac{F}{S}$.

Момент сили — фізична величина, яка визначається добутком модуля сили $|\vec{F}|$ і її плеча d : $|\vec{M}| = |\vec{F}|d$.

Невагомість — стан тіла, при якому вага тіла дорівнює нулю.

Неінерціальні системи відліку — системи відліку, в яких закон інерції не виконується.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів (рівняння Клаузіуса): тиск ідеального газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму газу і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.

Пара:

— **насичена** — пара, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною;

— **ненасичена** — пара, що не перебуває в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною.

Перевантаження — стан тіла, при якому його вага перевищує силу тяжіння.

Пароутворення — процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний.

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

Переміщення точки — це вектор або напрямлений відрізок прямої, який сполучає початкове положення точки з її кінцевим положенням.

Перший закон 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).

Полімери — сполуки з високою молярною масою, молекули яких складаються з великої кількості ланцюжків одного або кількох типів, що регулярно або нерегулярно повторюються.

Потенціальною енергією піднятого над Землею тіла називають таку фізичну величину E_p , яка при вільному падінні тіла зменшується рівно на стільки, на скільки зростає його кінетична енергія E_k : $\Delta E_p = -\Delta E_k$.

Правило важеля: важіль перебуває в рівновазі, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні до плечей.

Прискорення:

Прискоренням тіла в його рівноприскореному прямолінійному русі називають векторну фізичну величину, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу і дорівнює відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася.

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

Процес:

— **ізобарний** (з грецької *барос* — вага) — процес зміни стану термодинамічної системи при сталому тиску;

— **ізопроцес** — процес, що відбувається при незмінному значенні одного із параметрів;

— **ізотермічний** — процес зміни стану термодинамічної системи при сталій температурі;

— **ізохорний** (з грецької *хорема* — місткість) — процес зміни стану термодинамічної системи при сталому об'ємі.

Релятивістські явища (з латинської *релатив* — відносний) — явища, які виникають у системах відліку, що рухаються відносно спостерігача зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла.

Рівновага тіла нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.

Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від рівноважного положення рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги.

Рівнодійна сил — сила, яка замінює дію на матеріальну точку кількох сил.

Рідкі кристали (РК) — речовини, що мають одночасно властивості як рідин (текучість), так і кристалів (анізотропія).

Робота — фізична величина A , яка дорівнює зміні кінетичної енергії ΔE_k тіла внаслідок дії на нього сили F : $A = \Delta E_k$.

Рух:

— **механічний рух** — це зміна з часом взаємного положення в просторі матеріальних тіл або взаємного положення частин даного тіла;

— **нерівномірним рухом** називається рух, якщо серед інтервалів часу є такі рівні інтервали, за які тіло здійснює неоднакові переміщення;

— **прямолінійним рівномірним рухом** називається рух, при якому тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення;

— **рівномірним рухом тіла по колу** називають такий рух, при якому швидкість тіла змінюється за напрямом, але не змінюється за значенням;

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

Сила тертя ковзання — сила, що виникає при русі одного тіла по поверхні іншого; напрямлена вона протилежно переміщенню тіла відносно стичного з ним тіла.

Сили молекулярні — сили, що діють між атомами і молекулами речовини.

Систему відліку утворюють тіло відліку, з яким пов'язана система координат, і годинник для вимірювання часу.

Стала:

— **Авогадро** — в одному молі будь-якої речовини міститься однакове число атомів або молекул: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль (моль⁻¹);

— **Больцмана** — пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою у кельвінах: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

— **гравітаційна** — визначається силою, з якою притягуються два тіла масами по 1 кг кожне, що знаходяться на відстані 1 м одне від одного: $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг².

— **універсальна газова** $R = N_A k \cdot R = 8,31$ Дж/(К · моль).

Твердість — властивість тіла чинити опір проникненню в нього іншого тіла.

Температура кипіння — температура, при якій тиск насиченої водяної пари всередині рідини дорівнює зовнішньому тиску.

Теплообмін — процес передачі енергії від більш нагрітого тіла до менш нагрітого.

Термодинамічна система — тіло або група тіл, які взаємодіють з навколишнім середовищем, обмінюючись енергією.

Тертя спокою — тертя, що виникає між нерухомими одна відносно одної поверхнями.

Тиск:

— **насиченої пари** — незалежний від об'єму тиск пари p_n , при якому рідина перебуває в динамічній рівновазі зі своєю парою.

Тілом відліку називається тіло, відносно якого визначають положення інших тіл у різні моменти часу.

Точка кипіння — температура кипіння рідини при нормальному атмосферному тиску.

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

Третій закон Ньютона: сили, з якими які-небудь два тіла діють одне на одне, завжди рівні за значенням, але протилежні за напрямом.

Швидкість руху тіла:

— **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;

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

— **миттєва швидкість руху тіла**, або швидкість у даній точці, — це векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу, коли швидкість руху тіла, починаючи з даного моменту, перестає змінюватися за напрямом і значенням;

— **середня швидкість нерівномірного руху** — векторна фізична величина, яка характеризує переміщення, що його тіло в середньому здійснює за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося;

— **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.

Шлях — це довжина траєкторії, яку описує тіло або матеріальна точка під час руху за певний інтервал часу.

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

Предметно-іменний покажчик

- А**
 Абсолютна похибка вимірювань — 52
 Авогадро — 12
 Аморфні тіла — 225
 Анаксимандр — 7
 Анізотропія — 223
 Арістотель — 8, 9, 58
 Архімед — 8, 14
- Б**
 Бекон Роджер — 8
 Бекон Френсіс — 9
 Бернуллі Даниїл — 9
 Броунівський рух — 190
- В**
 Вага тіла — 115
 Відносна похибка вимірювань — 53
 Відносність руху — 25
 Випаровування — 208
 Вільне падіння тіла — 57
 Внутрішня енергія — 253
 Вологість повітря
 — абсолютна — 213
 — максимальна — 213
 — відносна — 214, 215
- Г**
 Гагарін — 117
 Газові закони — 200
 Галілей Галілео — 9, 58, 93, 112
 Галлей — 13
- Гей-Люссак — 11
 Гельмгольц — 13
 Генрі — 13
 Геракліт — 7
 Гесс — 12
 Гравітаційна взаємодія — 105
 Границя пружності — 231
 — текучості — 232
 — міцності — 232
 Гук Роберт — 13, 105, 106, 107, 230
 Гюйгенс — 13
- Д**
 Д'Аламбер — 9
 Декарт Рене — 9
 Демокріт — 7, 8
 Деформація
 — пружна — 226
 — пластична — 226
 — розтягу — 227
 — стиску — 227
 — зсуву — 227
 — кручення — 228
 — поперечного згину — 228
 Джоуль — 12, 13
 Динаміка — 80
 Динамометр — 85
 Дифузія — 191
- Е**
 Ейлер — 9
 Ейнштейн — 175
 Енергія — 150
 Епікур — 8

З

Закон

- Бойля—Маріотта — 201
- всесвітнього тяжіння — 106
- Гей-Люссака — 201
- Гука — 230
- додавання швидкостей — 37
- збереження енергії — 155
- збереження імпульсу — 144
- Ньютона перший — 88
- Ньютона другий — 97
- Ньютона третій — 98
- Шарля — 202

Зенон — 7, 70

Змочування — 221

Запас міцності — 223

І

- Ідеальний газ — 196
- Ізотропність — 224, 225
- Імпульс сили — 143
- Імпульс тіла — 143
- Інертність — 89
- Інерціальні системи відліку —

91

Інерія — 88

К

- Карно Саді — 11, 13, 259
- Кипіння — 211
- Кількість теплоти — 254
- Кількість речовини — 195
- Кінематика — 21
- Кінетична енергія рухомого тіла — 151
- Клапейрон — 11
- Клаузіус — 11, 262
- Коефіцієнт переважання — 115
- Коефіцієнт поверхневого натягу — 220

Конденсація — 209

Коперник Миколай — 9, 107

Ксенофан — 7

Кузанський Микола — 8

Л

Лавуазьє — 10

Лагранж — 9

Лаплас — 10, 242

Леонардо да Вінчі — 9

Ленц Емілій — 12

Ломоносов М. В. — 9, 10

М

Майєр — 12, 13

Максвелл — 14

Маса

— атомна — 194

— молекулярна — 194

Матеріальна точка — 22

Менделєєв Дмитро — 11, 47

Механіка — 20

Молекулярно-кінетична теорія — 189

Механічна напруга — 230

Момент сили — 134, 135

Н

Невагомість — 116

Неінерціальні системи відліку — 91

Ньюкомен — 10

Ньютон Ісаак — 13, 14, 15, 80, 106, 107

О

Основна задача механіки — 21

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів — 198

- П**
 Папен — 10
 Пара
 — насичена — 209
 — ненасичена — 210
 Парменід — 7
 Пароутворення — 208
 Перевантаження — 115
 Переміщення — 32
 Період обертання — 65
 Перше начало термодинаміки — 255
 Плече сили — 164
 Ползунов — 10, 259
 Полімери — 235
 Потенціальна енергія піднятого над Землею тіла — 153
 Потенціальна енергія пружно деформованого тіла — 154
 Правило важеля — 136
 Правило моментів — 135
 Правило паралелограма — 27
 Правило трикутника — 27
 Прискорення — 48, 97
 — доцентрове — 67
 Прискорення вільного падіння — 57, 110, 111
 Процес
 — адіабатний — 258
 — ізобарний — 201
 — ізопроцес — 200
 — ізотермічний — 200
 — ізохорний — 202
- Р**
 Радіус-вектор — 32
 Релятивістські явища — 174
 Реомюр — 10
 Рівновага тіла — 133, 136
 — байдужа — 138
 — нестійка — 137
 — стійка — 137
 Рівнодійна сил — 85
 Рівняння Менделєєва—Клапейрона — 200
 Рідкі кристали — 233
 Ріхман — 10
 Робота термодинамічного процесу — 256, 257
 Рух
 — механічний — 21
 — нерівномірний — 41
 — поступальний — 23
 — прямолінійний
 рівномірний — 34
 — рівномірний по колу — 64
 — рівноприскорений — 47
 — реактивний — 145
- С**
 Сила — 83, 84
 Сила реакції опори — 124
 Сила пружності — 125
 Сила тертя спокою — 125, 126
 Сила тертя ковзання — 127
 Сила тертя кочення — 128
 Сила тяжіння — 109
 Сили молекулярні — 192
 Система відліку — 23
 Спідометр — 44
 Стала
 — Авогадро — 195
 — Больцмана — 199
 — гравітаційна — 106, 109
 — універсальна газова — 199
- Т**
 Твердість — 232
 Температура кипіння — 212
 Теплообмін — 255
 Термодинамічна система — 253

Тертя спокою — 125

Тиск

— насиченої пари — 210

Тіло відліку — 23

Томсон Уільям — 10

Точка кипіння — 212

Траскторія руху — 31

У

Уатт Джеймс — 10, 259

Ф

Фалес із Мілета — 7

Фаренгейт — 10

Френель — 14

Фуко — 91, 92

Ц

Цельсій — 10

Центр тяжіння — 110

Ч

Частота обертання тіла — 65

Ш

Шарль — 12

Швидкість руху тіла — 35

— космічна — 118, 120

— кутова — 65, 66

— лінійна — 64, 66

— миттєва — 43, 44

— прямолінійного рівномірно-
го руху

— середня — 41, 43

Шлях — 31, 32

Ю

Юнг — 14, 230

Права авторів та видавничі права ДСВ «Освіта» захищені Законом України «Про авторське право і суміжні права» від 23.12.1993 р. (зі змінами від 11.07.2001 р.).

Друковане копіювання книги або її частини, будь-які інші контрафактні видання тягнуть за собою відповідальність згідно зі ст. 52 цього Закону.

Навчальне видання

СИРОТЮК Володимир Дмитрович
БАШТОВИЙ Володимир Іванович

ФІЗИКА

Підручник для 10 класу
загальноосвітніх навчальних закладів
(рівень стандарту)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Редактор *І. О. Пуніна*. Художній редактор *Т. М. Канарська*
Художник обкладинки *Т. М. Канарська*
Технічний редактор *Ц. Б. Федосіхіна*
Комп'ютерна верстка *М. Ю. Литвиненка*
Коректори *Л. С. Бобир, Н. Г. Сніцарук*

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 24,7 + 0,33 форзац.
Обл.-вид. арк. 25,5 + 0,45 форзац. Тираж 3000 пр.
Вид. № 37434. Зам. № 0-0942.

Набір та верстка комп'ютерного центру видавництва «Освіта»

Видавництво «Освіта»,
04053, м. Київ, вул. Юрія Коцюбинського, 5.
Свідоцтво ДК № 27 від 31.03.2000р.
www.osvitapublish.com.ua

Віддруковано з готових діапозитивів
ВАТ «Харківська книжкова фабрика «Глобус»»
Св. ДК № 2891 від 04.07.2007 р.
61012, м. Харків, вул. Енгельса, 11.