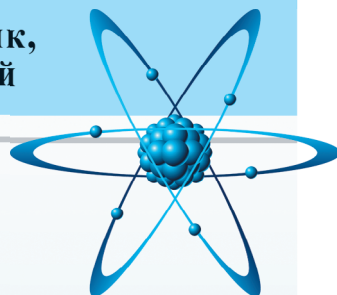


М. В. Головко, Ю. С. Мельник,
Л. В. Непорожня, В. В. Сіпій



ФІЗИКА

«Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О.І.)»

*підручник для 10 класу закладів
загальної середньої освіти*

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України



Київ
Педагогічна думка
2018

УДК 94(477)(075.3)
Ф50

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ МОН України від 31.05.2018 №551)

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ГОЛОВКО Микола Васильович
МЕЛЬНИК Юрій Степанович
НЕПОРОЖНЯ Лідія Вікторівна
СІПІЙ Володимир Володимирович

Фізика

(рівень стандарту,
за навчальною програмою
авторського колективу
під керівництвом Ляшенка О.І.)
підручник для 10 класу
закладів загальної середньої освіти

Редактор *Бартош С.В.*
Верстка *Мирончика Ю.П.*
Обкладинка *Мирончика Ю.П.*

Підписано до друку 31.07.2018 р.
Формат 70х100 1/16.
Гарнітура Петербург
Друк. офсетний. Папір офсетний.
Ум.друк.арк20,08.Обл.-вид.арк.19,08.
Наклад 30 465 пр.

Видавництво «Педагогічна думка»
04053, м. Київ,
вул. Січових Стрільців, 52-а, корп. 2;
тел./факс: (044) 481-38-85
books-xl@ukr.net
4813885@ukr.net

Свідоцтво про внесення
суб'єкта видавничих справи
до Державного реєстру видавців,
виготовників розповсюджувачів
видавничих продукції
Серія ДК №3563від 28.08.2009.

Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою ав-
торського колективу під керівництвом Ляшенка О.І.) підручник
для 10 класу закладів загальної середньої освіти/ Головка М.В.,
Мельник Ю.С., Непорожня Л.В., Сіпій В.В. — Київ: Педагогічна
думка, 2018. — 256 с.

ISBN 978-966-644-474-8.

УДК 94(477)(075.3)

ISBN 978-966-644-474-8

© М.В.Головка, Ю.С.Мельник,
Л.В.Непорожня, В.В.Сіпій., 2018
© Педагогічна думка, 2018

ЗМІСТ

Слово до учнів	5
Слово до вчителя.....	5
Вступ	
§ 1. Світоглядний потенціал фізики та астрономії	6
§ 2. Фізичні теорії. Фізика як теоретична основа сучасної астрономії	13
Розділ 1. Механіка	
§ 3. Механічний рух. Основна задача механіки.....	16
§ 4. Основні характеристики механічного руху	19
§ 5. Рівномірний прямолінійний рух.....	23
§ 6. Рівнозмінний рух	28
§ 7. Рівноприскорений прямолінійний рух	33
§ 8. Рівномірний рух по колу.....	37
Практикум із розв’язування задач №1	41
Виявляємо предметну компетентність	49
§ 9. Перший закон Ньютона	52
§ 10. Другий закон Ньютона.....	56
§ 11. Третій закон Ньютона	59
Практикум із розв’язування задач №2	61
Виявляємо предметну компетентність	64
§ 12. Закон всесвітнього тяжіння.....	65
§ 13. Гравітаційне поле та вага тіла	70
Практикум із розв’язування задач №3	72
§ 14. Деформації і сила пружності.....	80
Практикум із розв’язування задач №4	84
Виявляємо предметну компетентність	90
§ 15. Рівновага тіл	92
§ 16. Елементи механіки рідин і газів.....	98
Практикум із розв’язування задач №5	103
Виявляємо предметну компетентність	108
§ 17. Закон збереження імпульсу.....	109
§ 18. Механічна робота. Потужність	116
§ 19. Закон збереження механічної енергії. Застосування законів збереження в механіці	120
Практикум із розв’язування задач №6	127
Виявляємо предметну компетентність	129
§ 20. Межі застосування законів класичної механіки. Основи спеціальної теорії відносності	133
§ 21. Відносність часу та лінійних розмірів тіл. Релятивістський закон додавання швидкостей.....	137

Розділ 2. Молекулярна фізика та термодинаміка

§ 22. Сучасні дослідження будови речовини.....	144
§ 23. Основи молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.....	150
§ 24. Ідеальний газ. Тиск газу. Температура	155
§ 25. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу	159
§ 26. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроцеси	164
Практикум із розв'язування задач №7	170
Виконуємо навчальний проект разом.....	177
Виявляємо предметну компетентність	177
§ 27. Випаровування. Властивості насиченої та ненасиченої пари ..	180
§ 28. Вологість повітря та її вимірювання	182
§ 29. Рідини. Поверхневий натяг рідин	186
§ 30. Змочування. Капілярні явища	190
Практикум із розв'язування задач №8	192
§ 31. Рідкі кристали. Полімери. Наноматеріали	196
§ 32. Будова і властивості твердих тіл	201
§ 33. Внутрішня енергія. Способи зміни внутрішньої енергії тіла ..	208
§ 34. Теплові процеси та їх характеристики. Рівняння теплового балансу	211
§ 35. Робота в термодинаміці	214
§ 36. Закони термодинаміки	217
§ 37. Теплові двигуни.....	220
§ 38. Теплові машини.....	223
§ 39. Екологічні проблеми, пов'язані з використанням теплових машин	226
Практикум із розв'язування задач №9	228
Виявляємо предметну компетентність	236
Лабораторний практикум	238
Відповіді до вправ	253
Предметний покажчик	256

Слово до учнів

Шановні друзі! У 10-му класі ви розпочинаєте вивчення предмета «Фізика і астрономія», в якому висвітлюються основи фундаментальних наук про природу — фізики та астрономії. Цей курс поглиблює та розширює зміст базового курсу фізики, опанування якого ви завершили в 9-му класі, а також подає цілісний астрономічний зміст, з елементами якого ви ознайомилися під час вивчення природознавства.

Вивчаючи цей предмет, ви продовжите більш ґрунтовне опанування наукових основ фізики і астрономії, поглибите уявлення про особливості перебігу природних явищ та процесів, а також методів їх дослідження, використання в побуті, техніці та технологіях.

Важливо, щоб у старших класах ви не просто розширили свої знання з фізики та астрономії, а й навчилися використовувати їх для вирішення різноманітних навчальних та життєвих практичних завдань: розв'язувати фізичні задачі, планувати та реалізовувати експеримент, аналізувати його результати, оцінювати ефективність побутових приладів та запроваджувати енергоощадні технології. Все це сприятиме і успішній підготовці до складання зовнішнього незалежного оцінювання з фізики, свідомому вибору напрямку майбутньої навчальної та професійної діяльності, а також вступу до закладу вищої освіти.

Сподіваємося, що запропонований підручник допоможе вам у виконанні цих нелегких завдань та сприятиме розвитку фізичного мислення, формуванню сучасної науково-природничої картини світу, усвідомленню того, що кожна людина є невід'ємною частинкою природи і саме від нас залежить її майбутнє.

До підручника включено різноманітні творчі завдання на формування практичних умінь і навичок, практикум із розв'язування фізичних задач та лабораторний практикум. Якщо наполегливо й творчо підійдете до виконання навчальних проєктів, використовуючи знання та вміння з предмета, можливо, вам вдасться зробити й власні відкриття, що в майбутньому утворять основу нових сучасних технологій.

ґрунтовне опанування фізики і астрономії передбачає систематичну самостійну роботу з матеріалом, виконання астрономічних і фізичних спостережень та дослідів, розв'язування задач із використанням підручника. Виконуючи рекомендовані в підручнику завдання, пропонуйте власні оригінальні способи їх розв'язання.

Намагайтеся не тільки уважно прочитати матеріал параграфів, а й проаналізувати та усвідомити прочитане, записати основні моменти, накреслити графіки або схеми. Виконуйте вправи та завдання для самоконтролю, вміщених наприкінці кожного параграфа. Це допоможе закріпити вивчений матеріал. Якщо ви не знаходите в підручнику відповіді на всі свої запитання, скористайтеся додатковими джерелами, наприклад пошуковими системами, але пам'ятайте, що користуватися мережею Інтернет потрібно, наперед, з метою розв'язання навчально-пізнавальних завдань.

Тож бажаємо вам творчого, цікавого та успішного вивчення фізики і астрономії.

Автори

Слово до вчителя

Підручник є складовою навчально-методичного забезпечення базового предмету «Фізика і астрономія», вивчення якого передбачено Типовими навчальними планами 10–11 класів закладів загальної середньої освіти (наказ Міністерства освіти і науки України від 24.11. 2017 №1541).

Зміст підручника відповідає навчальній програмі з фізики і астрономії, затвердженій МОН України (наказ від 24.11. 2017 р. №1539, режим доступу: <http://mon.gov.ua/activity/education/zagalna-serednya/navchalni-programy.html>), згідно з якою на вивчення предмета в 10-му класі відведено 3 години на тиждень.

Оскільки в старшій школі засвоєння фізичного і астрономічного компонентів освітньої галузі «Природознавство» Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти має споріднений предмет навчання, методи дослідження та робить спільний внесок у формування наукової картини світу, ці два компоненти об'єднано в єдиний навчальний предмет «Фізика і астрономія» зі збереженням своєрідності кожного з цих складників.

На базовому рівні ці складники можуть реалізовуватися як у вигляді відносно самостійних модулів, так і інтегровано. Основний астрономічний компонент віднесено до 11-го класу, а в підручнику 10 класу елементи астрономії включено до «Вступу» та розділу «Механіка».

Оскільки навчання фізики й астрономії здійснюється на компетентнісних засадах, методичний апарат підручника орієнтований на формування ключових і предметної компетентностей учнів. Згідно з авторською концепцією, у підручнику втілено спробу реалізувати компетентнісний та особистісний підхід через побудову методичного апарату, диференційовану систему вправ, різноманітність завдань та вправ для самостійної роботи учнів, домашній фізичний експеримент, навчальні проєкти, лабораторний практикум та практикум із розв'язування задач.

З цією метою до підручника включено практико- та компетентнісно орієнтовані завдання, вирішення яких передбачає використання набутих учнями знань та умінь із фізики і астрономії в практичних ситуаціях. Виокремлено спеціальну рубрику «Виявляємо предметну компетентність», в якій учням пропонуються завдання на виявлення рівня сформованості предметної компетентності у формі, максимально наближеній до формату зовнішнього незалежного оцінювання.

Сподіваємося, запропонований підручник стане вам у пригоді для успішного вивчення фізики і астрономії.

Автори

ВСТУП

§ 1. Світоглядний потенціал фізики та астрономії

- ▶ *Фізика та астрономія у пізнанні речовини, поля, простору і часу*
- ▶ *Методи наукового пізнання природи*
- ▶ *Основні етапи розвитку фізики і астрономії в Україні та світі*

ФІЗИКА ТА АСТРОНОМІЯ У ПІЗНАННІ РЕЧОВИНИ, ПОЛЯ, ПРОСТОРУ І ЧАСУ. У стародавні часи існувала єдина наука про природу — природознавство. Із часом обсяг наукових знань про навколишній світ неабияк збільшився, і природознавство розділилось на окремі науки: астрономію, географію, біологію, хімію, фізику та інші.

Фізика — наука про найбільш загальні та фундаментальні закономірності, що визначають структуру й еволюцію матеріального світу.

Астрономія — наука про небесні тіла, про закони їхнього руху, будови і розвитку, а також про будову й розвиток Всесвіту в цілому.

У фізиці вивчають фізичні явища і фізичні властивості матерії. Багато фізичних явищ мають спільні властивості і, залежно від цього, їх поділяють на механічні, теплові, світлові, електромагнітні та інші.

Саме завдяки загальності та фундаментальності законів фізики вони використовуються в усіх природничих науках. Виникли й успішно розвиваються нові напрями — астрофізика, геофізика, біофізика тощо.

МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ ПРИРОДИ. Яким чином, якими способами здобувають наукові знання у фізиці та астрономії? Дослідження явищ починається зі спостереження за ними. Оскільки майже всі об'єкти, які вивчає астрономія, перебувають за межами земної атмосфери, то її основним методом є спостереження. Це її особливість порівняно з іншими природничими науками. Щоб зрозуміти і описати події, які відбуваються, вчені запроваджують фізичні величини, такі, наприклад, як швидкість, сила, тиск, температура тощо.

За допомогою емпіричних методів пізнання (спостереження, вимірювання, експерименти, досліди) накопичується великий фактичний матеріал про певну групу явищ природи. На основі цього матеріалу створюється припущення, обґрунтоване науковими фактами, яке пояснює хід явищ, — гіпотеза.

Справедливість гіпотези перевіряється новими експериментами. Якщо правильність гіпотези підтверджується, то на її основі формулюються закони і створюється теорія, яка повинна дати задовільні якісні й кількісні пояснення явищ, що відбуваються, а також передбачати нові явища.

Джерелом фізичного знання і критерієм¹ його істинності є дослід та експеримент.

Істинним є те знання, яке підтверджено дослідом, і цей дослід може бути відтворений (мал.1.1)



Мал. 1.1. Експеримент — основне джерело знань про природу: а) члени Французької академії А. Ампер та Ф. Араго вивчають дію магнітного поля на провідник зі струмом; б) перший космонавт незалежної України Л. Каденюк проводить експеримент із вивчення впливу мікрогравітації на рослини в космосі; в) експерименти на адронному колайдері; г) експерименти на поверхні Марса виконує автоматична міжпланетна станція «К'юріосіті»

Дослід та експеримент, пов'язані зі спостереженням, але не тотожні йому: в науковому експерименті дослідники цілеспрямовано впливають на досліджуваний процес, аби виявити зв'язок причин і наслідків спостережуваного процесу. Експеримент є основою фізики.

Експериментом у фізиці називають спеціально поставлені дослід чи спостереження.

Фізичний експеримент має задовольняти таким вимогам:

1. Відтворюваність експериментальних результатів у разі виконання будь-якої кількості незалежних вимірювань (зокрема й таких, що проводяться на різних установках, різними експериментаторами, у різних місцях і за різних умов).

2. Максимальна точність вимірювання.

3. Повний контроль за всіма чинниками, які визначають перебіг досліджуваного явища.

Поміркуйте і наведіть приклади наукового експерименту і наукового спостереження.

¹ Від грец. *kriterion* – засіб для суджень, мірило оцінки.

У сучасній фізиці крім експериментального важливе значення має теоретичний метод пізнання. Вивчення фізичних явищ на мікро- та нанорівнях спершу моделюється, досліджується методами математики, і лише потім перевіряється експериментом.

ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ. Фізика і астрономія — одні з найдавніших наук про природу. Найперші астрономічні знання — це не та астрономія, як ми її розуміємо нині. Ці знання були лише засобом для задоволення потреб господарського життя.

У II ст. н. е. Клавдій Птолемей створив геоцентричну систему світу — відносно складну математичну модель, яка для свого часу задовільно пояснювала видимі рухи планет і, що було тоді важливо, давала змогу визначати їхнє положення на небесній сфері наперед, у майбутньому. Хоча вона не відображала справжньої будови Сонячної системи її використовували упродовж майже 1500 років.

Вважають, що сучасна фізика почала свій розвиток із праць Галілея, який став основоположником експериментально-математичного методу вивчення природи та зробив фізику наукою про універсальні закони природи. Він сформулював найважливіші принципи механічного світу. Його дослідження кардинально вплинули на розвиток наукової думки. Саме від нього бере початок фізика як наука Найважливішим внеском Галілео Галілея в науку була свідомо й послідовна заміна пасивного спостереження активним експериментом. Галілей першим використав телескоп для вивчення небесних тіл. Результатами цих спостережень і експериментів стали зроблені вченим наукові відкриття.

Потужним поштовхом до формування фізики як науки стали наукові праці Ісаака Ньютона. На основі сформульованих ним законів було побудовано так звану ньютонівську механіку, на базі якої розвинулася класична фізика, а в астрономії виник новий розділ — небесна механіка.

Експерименти класичної фізики проводилися виключно з макроскопічними тілами (тобто, з тілами, що складаються з величезної кількості атомів і молекул), які рухалися порівняно повільно (зі швидкістю набагато меншою ніж 300 000 км/с).

У XIX ст. М. Фарадей та Д. Максвелл сформулювали основні закони електромагнетизму, які спричинили подальший розвиток електродинаміки. Наукові відкриття, зроблені цими вченими лягли в основу розроблення електростанцій, засобів теле- і радіозв'язку тощо.

На початку XX ст. А. Ейнштейн переформулював основні рівняння механіки так, щоб їх можна було застосовувати до вивчення рухів зі швидкостями, наближеними до швидкості світла, та заклав основи теорії гравітації (всесвітнього тяжіння). Але найважливішими науковими здобутками цього періоду стали відкриття закономірностей мікросвіту. Наукові дослідження XX ст. спричинили виникнення нових галузей фізики: квантово-механічної а потім і квантово-релятивістської фізики. Наразі квантово-релятивістська фізика є найбільш загальною та універсальною формою подання сучасного тлумачення навколишнього світу. Але з появою квантової релятивістської

фізики класична фізика не зникла. Визначилися лише рамки, у межах яких вона діє.

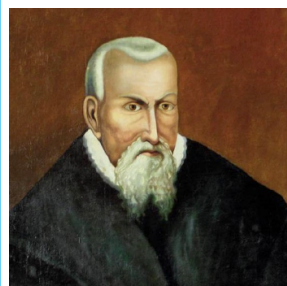
Отже, на кожному історичному етапі конкретний зміст фізики, як і астрономії, визначався тодішнім рівнем знань про природу. Нині об'єктами дослідження у фізиці є найдрібніші частинки речовини (аж до так званих кварків), віддалені від Землі на тисячі світлових років таємничі квазари та «чорні діри» а також Світ (Всесвіт) у його цілісному розвитку.

В історії розвитку фізичної та астрономічної науки українські вчені посідають вагомe місце поруч із всесвітньо відомими дослідниками природи. Одним із перших українських середньовічних філософів та астрономів був Юрій Котермак із Дрогобича, ректор Болонського університету, автор книги «Прогностична оцінка» (1483 р.).

Біля витоків одного із найвизначніших досягнень людства — відкриття «Х»-променів, за яке В. Рентген був удостоєний Нобелівської премії, стояв Іван Пулюй. Український фізик отримав перші високоякісні знімки з їх застосуванням. У другій половині XIX — на початку XX ст. учений був відомий в Європі своїми фундаментальними працями з молекулярної фізики, дослідження властивостей та природи катодних променів.

Наша держава має значний науковий та технологічний потенціал. Його утворюють потужні науково-дослідні установи та виробничі об'єднання. Києва, Дніпра, Одеси, Харкова, в яких зароджувалися та функціонують й сьогодні наукові школи фізики та астрономії, всесвітньо відомі своїми результатами. Провідну роль у становленні фізики і астрономії в нашій країні відіграють наукові установи Національної академії наук України (НАН України), яка була заснована у 1918 р. як Всеукраїнська академія наук.

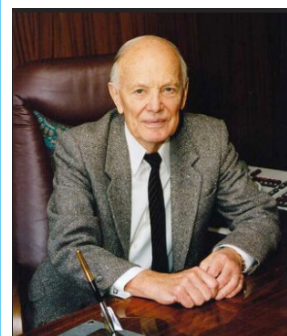
Однією з перших вітчизняних науково-дослідних установ, де упродовж багатьох років років здійснюються фундаментальні дослідження в галузі механіки, є Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України. Це — один із перших науково-дослідних інститутів у складі Всеукраїнської академії наук, дирек-



Юрій Котермак
(Юрій Дрогобич)
(1450—1494)



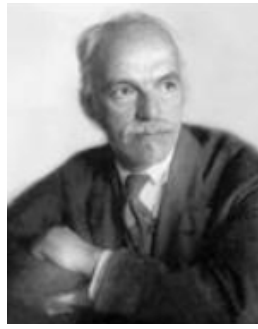
Іван Павлович Пулюй
(1845—1917)



Борис Євгенович Патон, президент НАН України, всесвітньо відомий учений у галузі електрозварювання



Степан Прокопович Тимошенко (1878—1972), академік Всеукраїнської академії наук, всесвітньо відомий вчений у галузі механіки, директор-засновник Інституту технічної механіки



Олександр Генріхович Гольдман (1884—1971), академік Академії наук УРСР, директор-засновник Інституту фізики у Києві (1929 р.)



Віктор Григорович Бар'яхтар, директор-засновник, почесний директор Інституту магнетизму НАН України, академік, Герой України, видатний учений у галузі теоретичної фізики, фізики твердого тіла та магнітних явищ

тором-засновником якого став видатний фахівець із теорії міцності, академік С.П. Тимошенко.

Сучасні дослідження з фізики конденсованого стану, м'яких речовин, нанофізики та наноелектроніки, фізики лазерів, нелінійної та сингулярної оптики, голографії, фізики поверхні, емісійної та плазмової електроніки здійснюються в Інституті фізики НАН України.

В Інституті магнетизму НАН України досліджуються проблеми магнетизму, створюються нові магнітні матеріали (магнітні носії з надвисокою щільністю запису інформації, матеріали з ефектом магнітної пам'яті), розробляються заходи з ліквідації наслідків таких екологічних катастроф світового масштабу, як аварія на Чорнобильській АЕС.

В Інституті ядерних досліджень НАН України здійснюються дослідження з ядерної фізики, фізики конденсованого стану речовини, матеріалознавства, атомної енергетики, радіоекології, виробництва радіоізоотопів. На унікальному приладі — ізохронному циклотроні «У-240» виконуються експерименти з просторово-змінними магнітними полями, в яких утримуються на заданих орбітах прискорені частинки, незалежно від зміни їхніх мас завдяки релятивістським ефектам, досліджується поділ важких ядер (мал. 1.2).



Мал. 1.2.

Ізохронний циклотрон У-240

Перші професійні астрономічні обсерваторії в Україні було засновано в університетах, які нині є провідними закладами вищої освіти, — Львівському, Київському, Одеському і Харківському. Окрему історію має обсерваторія в Миколаєві. Її створили в 1821 р. для потреб Чорноморського флоту — забезпечення його точним часом і морехідними картами, а також для налагодження навігаційних приладів та навчання штурманів астрономічних методів орієнтування.

Університетські обсерваторії дотепер продовжують свою науково-освітню діяльність. З ними пов'язана лівова частка історії астрономічної науки в Україні, адже тут працювали чи здобували професійну освіту майже всі українські астрономи.

Астрономічні обсерваторії в Україні мають не лише провідні (класичні) університети, а й НАН України. Це відносно молоді наукові установи, але великі наукові центри. Дві з них, Радіоастрономічний інститут та Полтавська гравіметрична обсерваторія, є спеціалізованими установами, де виконують дослідження з радіоастрономії та гравіметрії.

Натомість Головна астрономічна обсерваторія (ГАО) НАН України (м. Київ, Голосіїв) виконує широкий спектр астрономічних досліджень — позиційна астрономія та космічна геодинаміка, фізика Сонця і тіл Сонячної системи, фізика й еволюція зір та галактик, фізика комет та космічної плазми, астрономічне й космічне приладобудування. Її науковці створили Атлас зворотного боку Місяця, зоряний каталог ФОНАК, оригінальні спектральні, фотометричні й поляриметричні прилади, з допомогою яких визначили фізичні властивості атмосфер Марса, Юпітера й Сатурна.

У ГАО також розроблено низку фотометричних моделей комет та фізична теорія ядер комет, оригінальні методи і програмне забезпечення для спостережень за космічними та астрономічними об'єктами і для обробки отриманих даних.

Українська астрономія має кілька унікальних телескопів. Одним із кращих у світі за спектральною роздільною здатністю є горизонтальний сонячний телескоп АЦУ-5 Ернеста Гуртовенка, встановлений у ГАО НАН України (мал. 1.3).



**Зінаїда Миколаївна
Ахентьєва**

(1900—1969),
українська фізик
і астроном, член-
кореспондент НАН
України, багаторічна
директорка
Полтавської
гравіметричної
обсерваторії, під
керівництвом якої
установа стала однією
з провідних у Європі



**Ярослав Степанович
Яцків,**

директор ГАО, акаде-
мік НАН України,
відомий фахівець із
космічної геодинаміки,
фундаментальної
астрометрії та зоряної
астрономії



а б
Мал. 1.3. Целостатна група (а)
 та об'єкти горизонтального
 сонячного телескопа (б)
 АЦУ-5 ГАО НАН України



**Клим Іванович
 Чурюмов**
 (1937—2017),
 член-кор. НАН України

В Україні під Харковом працює найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону — УТР-2 (український Т-подібний радіотелескоп-2) (мал. 1.4.), призначений для спостережень у діапазоні 8—33 МГц (довжина хвиль 10—20 м). Його ефективна площа (площа, якою він сприймає випромінювання) становить 150 тисяч кв. м, що перевищує сумарну ефективну площу всіх інших радіотелескопів у світі.

Українські астрономи мають змогу також виконувати спостереження з допомогою найбільших у світі телескопів, наприклад, Космічного телескопа імені Габбла чи Дуже великого телескопа Європейської південної обсерваторії. Або брати дані астрономічних спостережень з Міжнародної віртуальної обсерваторії.

Українські вчені долучаються до найсучасніших астрономічних експериментів. 12 листопада 2014 р. вперше в історії людства космічний зонд було висаджено на поверхню комети Чурюмова–Герасименко (67Р) та отримано унікальні фізичні, астрономічні, хімічні дані (мал. 1.5). У межах космічної місії «Розета» упродовж 12 років здійснювалися дослідження комети, відкритої в 1969 році вітчизняним астрономом К. І. Чурюмовим та аспіранткою С. І. Герасименко.



Мал. 1.4.
 Антени радіотелескопа
 УТР-2



Мал. 1.5. Ядро комети
 Чурюмова–Герасименко
 та космічний зонд «Розета»

? Запитання для самоперевірки

1. Що є предметом вивчення у фізиці та астрономії?
2. Якою є роль фізики та астрономії в життєдіяльності людини та суспільному розвитку?
3. Які методи пізнання використовують фізична та астрономічна науки?
4. Що таке наукова гіпотеза?
5. Охарактеризуйте основні етапи розвитку фізико-астрономічного знання.
6. Висвітліть внесок українських учених у розвиток фізики та астрономії у світі.

§ 2. Фізичні теорії. Фізика як теоретична основа сучасної астрономії

- ▶ Початкові відомості про фундаментальні фізичні теорії
- ▶ Фізика як теоретична основа сучасної астрономії

ПОЧАТКОВІ ВІДОМОСТІ ПРО ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ФІЗИЧНІ ТЕОРІЇ.

Науковий експеримент дає можливість ученим відкривати *фізичні закони*.

Фізичний закон — опис співвідношень у природі, який виявляється за певних умов у експерименті (досліді).

Не всі закони фізики мають однакове наукове значення. У фізиці виокремлюють фундаментальні, часткові та закони фундаментального походження.

Фундаментальним, наприклад, є закон збереження енергії. Закони, які виконуються лише у певних обмежених умовах, називаються частковими. Це, наприклад, закон Гука, закон Ома. Закони, які можна математично вивести з фундаментальних, називають законами фундаментального походження.

Г. Галілей дав кількісний опис вільного падіння тіл на землю: швидкість вільного падіння не залежить від їхньої маси. Разом з тим він не зміг дати відповідь на запитання, чому тіла падають. Ісаак Ньютон, основоположник фундаментальної фізичної теорії, висловив гіпотезу, згідно з якою причиною падіння тіл на Землю є всесвітнє тяжіння. Ньютоном була створена, як побачимо далі, класична теорія всесвітнього тяжіння.

Сукупність законів, що описують широке коло явищ, називають науковою теорією.

Наприклад, закони Ньютона становлять зміст однієї з перших фізичних теорій — класичної механіки. Зміст класичної теорії електромагнетизму утворюють закони, сформульовані англійськими фізиками М. Фарадеєм і Дж. Максвеллом.

Теорія (грец. *theoria* — дослідження, спостереження) — це система фізичних знань, яка дає цілісне, системне відображення закономірних

і сутнісних зв'язків між певними фізичними явищами і є структурним елементом фізичної картини світу.

У фізиці розглядаються такі фізичні теорії: класична механіка, молекулярно-кінетична теорія, статистична фізика, електродинаміка тощо.

Будь-яка теорія побудована за таким принципом: встановлюється основа теорії (спостережувані явища, ідеалізована модель, фізичні величини) → формується ядро теорії (закони, принципи, постулати) → наслідки теорії (межі дії теорії, передбачення нових процесів, практичне застосування).

Усі фізичні теорії пов'язані між собою і визначають структуру фізики як науки.

ФІЗИКА ЯК ТЕОРЕТИЧНА ОСНОВА СУЧАСНОЇ АСТРОНОМІЇ. Сучасну астрономію неможливо уявити без фізики, бо в астрономічних дослідженнях застосовують усі фундаментальні закони фізики і теорії, широко використовують методи фізики. Наприклад, закон всесвітнього тяжіння лежить в основі небесної механіки, а на закони геометричної оптики спираються під час розробки оптичних схем телескопів. Дослідження спектрального складу світла (спектральний аналіз) є основою астрофізики. За допомогою спектрального аналізу астрономи навчилися визначати не лише хімічний склад небесних тіл, а й температуру, швидкість руху, відстані до них та багато іншого.

Водночас вивчення Космосу дало змогу зробити багато важливих відкриттів. Наприклад, було виявлено невідомі раніше на Землі стани речовини й нові джерела енергії (зокрема, атомна енергія). Принцип інерції, відкритий Галілео Галілеєм, закон всесвітнього тяжіння Ісаака Ньютона й загальна теорія відносності Альберта Ейнштейна — усі ці відкриття були зроблені на підставі астрономічних даних. Легенда про яблуко, що впало на голову І. Ньютону й підштовхнуло його до виявлення закону всесвітнього тяжіння, красива. Але геніальній здогадці науковця передував ретельний аналіз руху Місяця навколо Землі.

А. Ейнштейн вважав, що інтелектуальні здобутки, без яких розвиток сучасної техніки неможливий, отримані переважно завдяки спостереженням зоряного неба.

Нині завдяки астрономії Всесвіт став для дослідників величезною науковою лабораторією, в якій відбувається пошук технічних і технологічних рішень на благо людини. Астрономія, спираючись на знання з фізики, здобуває фундаментальні знання про довкілля, збагачує фізику і хімію результатами досліджень речовини за таких фізичних умов (температура, тиск, магнітне поле тощо), які неможливо відтворити в земних лабораторіях.

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають фізичним законом?
2. Назвіть основні компоненти фізичної теорії.
3. Які фундаментальні фізичні теорії ви знаєте?
4. Чому фізика є теоретичною основою сучасної астрономії? Наведіть приклади.

РОЗДІЛ 1. МЕХАНІКА

Перше, що впадає у вічі під час спостереження навколишнього світу, — його мінливість. Рухаються люди й автомобілі, хмари, зорі та Місяць, листя на деревах і краплини дощу. Рухаються також кров у судинах, сік у рослинах, вода у річках.

Характерною особливістю всіх цих явищ і процесів є зміна положення предметів (фізичних тіл) один відносно одного і відносно Землі з плином часу. Чи йде пішохід, чи пролітає літак — їх положення відносно Землі з часом змінюється.

Спостерігаючи природні явища, людина з давніх часів намагалася збагнути, що «рухає» Землю та світила. Якщо рух тіл на Землі досить очевидний, то пояснити рух небесних тіл було складніше. Відповіді на ці питання дає механіка — розділ фізики, в якому вивчаються рух і взаємодія тіл.

Механіка — одна з найдавніших наук про природу, наукові основи якої було закладено видатним італійським ученим Галілео Галілеєм (1564—1642) та розвинуто Ісааком Ньютоном (1642—1727). Основне завдання механіки полягає у визначенні положення тіла (координати) відносно інших тіл у будь-який момент часу. Вивчити рух тіла означає встановити, як змінюється його положення в просторі з плином часу.

У свою чергу, механіка поділяється на кінематику (вивчає рух тіл, без урахування їх взаємодії, чинників, що його зумовлюють), динаміку (встановлює зв'язки між кінематичними характеристиками руху і чинниками, що його зумовлюють, тобто закони руху) та статику (розглядає умови рівноваги тіл).

У механіці є фізичні величини, що характеризують рух і зберігаються за певних умов. Такими величинами є імпульс та енергія. Властивість імпульсу та енергії зберігатися є одним із фундаментальних законів природи.

§ 3. Механічний рух. Основна задача механіки

- ▶ Механічний рух та його види
- ▶ Відносність механічного руху
- ▶ Основна задача механіки

МЕХАНІЧНИЙ РУХ ТА ЙОГО ВИДИ. Ви вже знаєте, що невід’ємною формою існування матерії у Всесвіті є рух. Земля обертається навколо власної осі та навколо Сонця, яке, у свою чергу, разом із усіма тілами Сонячної системи рухається навколо центру Галактики. Частина речовини, яка має певну форму та об’єм (Земля, Сонце, планети, рослини, тварини), усе, що нас оточує, і, нарешті, ми самі — називається *фізичними тілами*.

Механічним рухом називають зміну просторового положення тіла відносно інших тіл з плином часу.

Найпростішим його видом є поступальний рух, під час якого всі точки тіла рухаються однаково, а будь-яка подумки проведена в ньому пряма, залишається паралельною самою собі.

Траєкторією називають лінію, вздовж якої рухається тіло (точка).

За її виглядом механічні рухи поділяють на прямолінійні (траєкторія — пряма лінія) й криволінійні (траєкторія — крива лінія).

Кожне тіло має певні розміри, а отже, різні його точки перебувають одночасно в різних місцях простору. Як визначити положення всього тіла? Загалом це зробити складно. У багатьох задачах при дослідженні руху тіла можна обмежити описом руху лише однієї його точки. Тоді рухоме тіло подумки замінюють однією точкою (ідея І. Ньютона).

Тіло, розмірами якого за певних умов руху можна знехтувати, називають матеріальною точкою.

Матеріальна точка є найпростішою моделлю тіла, використання якої спрощує опис механічного руху і надає можливість застосовувати відповідний математичний апарат.

Будь-яке тіло, якщо розміри його важливі, в механіці поділяють на сукупність матеріальних точок і вивчають рух кожної з них, а потім здійснюють потрібні узагальнення.

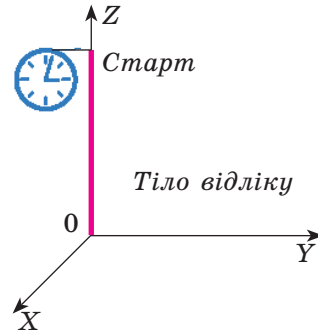
Коли ж тіло можна вважати матеріальною точкою? Чи можна тіло вважати матеріальною точкою, залежить не від його розмірів («велике» воно чи «мале»), а від поставленої задачі. Одне й те ж тіло, наприклад, літак чи Земля, в одних задачах може розглядатись як матеріальна точка, в інших — ні.

Тіло можна вважати матеріальною точкою, якщо виконується хоча б одна з таких умов:

- розміри тіла малі порівняно з пройденою відстанню;
- усі точки тіла рухаються однаково, тобто воно здійснює поступальний рух.

ВІДНОСНІСТЬ МЕХАНІЧНОГО РУХУ. Щоб охарактеризувати зміну положення тіла в просторі, потрібно обрати тіло, відносно якого розглядається цей рух. Таке тіло називають тілом відліку. За тіло відліку зазвичай приймають таке, яке жорстко пов'язане із Землею (будинок, дерево, залізничні колії, причал тощо). Рух планет, наприклад, розглядають відносно Сонця, а не Землі чи іншої планети. З метою визначення місця розташування об'єкта (матеріальної точки) з тілом відліку пов'язують систему координат.

З метою повної характеристики руху слід вибрати ще й засіб і спосіб вимірювання часу, наприклад, годинник, нерухомий відносно тіла відліку (мал. 3.1).

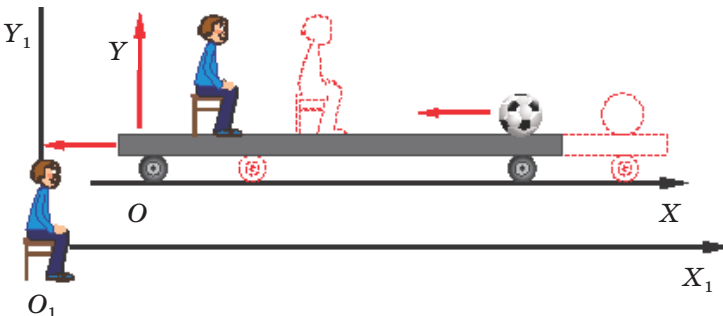


Мал. 3.1. Система відліку

Тіло відліку, систему координат і вибраний спосіб вимірювання часу, які пов'язані з тілом, називають системою відліку.

Положення тіла у просторі визначається у будь-який момент часу трьома координатами: $x = f(t)$; $y = f(t)$; $z = f(t)$. Знання залежності координати тіла від часу (рівняння руху) дає змогу визначити час і місцезнаходження тіла.

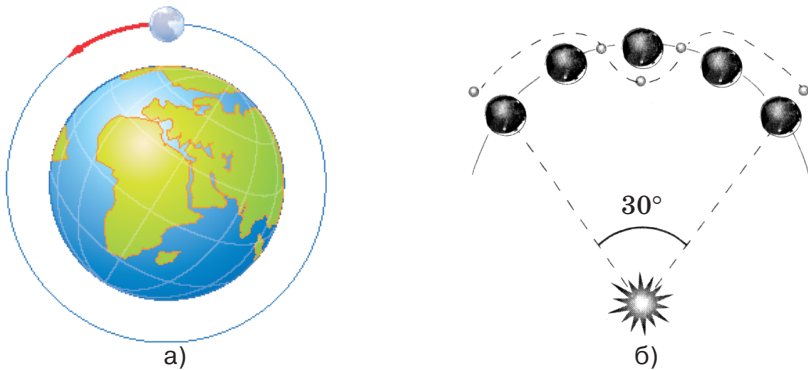
Просторове положення тіла можна одночасно розглядати в різних системах координат, відносно яких воно буде різним. Наприклад, нерухома людина знаходиться на платформі і спостерігає за тілом, що лежить на ній (мал. 3.2).



Мал. 3.2. Відносність руху

Пов'яжемо із платформою систему відліку XOY . Для спостерігача на платформі тіло перебуває в стані спокою. Водночас для спостерігача, що знаходиться біля платформи (система $X_1O_1Y_1$), — тіло рухається. Отже, одне й те ж тіло у різних системах відліку рухається по-різному. В одній системі (XOY) воно перебуває у стані спокою, а в іншій ($X_1O_1Y_1$) — рухається. Тому у фізиці говорять про відносність механічного руху і його завжди розглядають у певній системі відліку, від вибору якої залежить і вигляд траєкторії руху тіла.

На мал. 3.3 зображено траєкторії руху Місяця в гео- та геліоцентричних системах відліку.



Мал. 3.3. Траєкторія руху Місяця:

- а) відносно Землі (геоцентрична система відліку);
 б) відносно Сонця (геліоцентрична система відліку)

ОСНОВНА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ. Так, астрономи, користуючись законами механіки, можуть точно обчислювати координати небесних тіл у будь-який момент часу. Тому вони передбачають такі явища, як, наприклад, сонячні та місячні затемнення.

Основна задача механіки — визначення положення (координати) тіла у будь-який момент часу.

Застосування законів механіки дає змогу визначити положення тіл не лише в майбутньому, а й у минулому. Наприклад, визначити точну дату початку походу князя Ігоря проти половців історикам допомогли астрономи: оскільки в «Слові о полку Ігоревім», в якому описано цей похід, зазначено, що перед вступом Ігоря на землю Половецьку відбулося повне сонячне затемнення. За цим астрономічним явищем можна встановити, що подія відбулася у травні 1185 р.

Учені, що запускають ракету-носіє штучного супутника Землі, користуються законами механіки, аби передбачити, де перебуватиме супутник у будь-який момент часу. Це є обов'язковою умовою, наприклад, успішного стикування супутників, запущених із різних континентів, здійснення посадок на поверхні Місяця, Марса чи Венери.

Щоб влучити в ціль, траєкторію артилерійського снаряда розраховують за законами механіки. Крім того, за допомогою законів класичної

механіки можна обчислити швидкість тіл, період їх обертання, гальмівний шлях транспортних засобів і виконати багато інших завдань.

! Головне в цьому параграфі

Механіка — це розділ фізики, в якому вивчаються рух і взаємодія тіл.

Механічним рухом називають зміну просторового положення тіла відносно інших з плином часу.

Траєкторією руху називають лінію, вздовж якої рухається тіло.

Тіло, розмірами якого за певних умов руху можна знехтувати, називають матеріальною точкою.

Тіло відліку, систему координат і вибраний спосіб вимірювання часу, які пов'язані з тілом, називають системою відліку.

Рух завжди розглядають відносно певної системи відліку, тому говорять, що механічний рух є відносним, так само як і стан спокою.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке механічний рух?
2. Що таке траєкторія?
3. На які види поділяють рухи залежно від траєкторії?
4. Що розуміють під матеріальною точкою?
5. Коли тіло можна вважати матеріальною точкою, а коли — ні? Наведіть приклади.
6. Що називають системою відліку? З чого вона складається?
7. У чому полягає відносність руху?
8. У чому полягає основна задача механіки?

Вправа до § 3

- 1 (с). Наведіть приклад системи відліку, в якій простіше описувати: а) рух потяга?; б) рух планет?
- 2 (д). Чи залежить вид траєкторії від вибору системи відліку? Відповідь поясніть.

§ 4. Основні характеристики механічного руху

- ▶ Шлях і переміщення
- ▶ Швидкість руху. Додавання швидкостей

ШЛЯХ І ПЕРЕМІЩЕННЯ. Під час руху тіла кожна з його точок рухається вздовж траєкторії та проходить деякий шлях.

Шлях — довжина ділянки траєкторії, яку тіло проходить за певний проміжок часу.

Шлях — скалярна величина, яка позначається латинською літерою l . Його одиниця в СІ — метр (м). Шлях характеризує, як далеко перемістилося тіло вздовж власної траєкторії, але не вказує на те, у який бік воно рухається і де, власне, перебуває у певний момент часу. Щоб

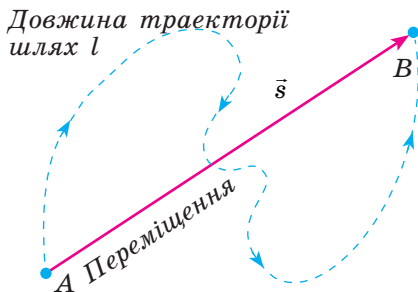
визначити положення в довільний момент часу потрібно знати його переміщення.

Переміщенням називають вектор, який сполучає початкове й кінцеве положення тіла і спрямований із початкової точки руху в кінцеву.

На мал. 4.1 відрізком прямої AB зображується переміщення матеріальної точки під час руху з точки A у точку B . Переміщення позначають літерою \vec{s} . Переміщення напрямлене від початкової до кінцевої точки руху.

Модуль вектора переміщення позначають $|\vec{s}|$ або просто s .

Варто звернути увагу на те, що шлях є величиною скалярною, а переміщення — векторною. Шлях завжди більший від модуля переміщення і лише під час прямолінійного руху шлях може чисельно дорівнювати переміщенню (якщо тіло не змінює напрямку руху).



Мал. 4.1. Траєкторія, шлях і переміщення

ШВИДКІСТЬ РУХУ. ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ. З повсякденного життя вам відомо, що за один і той же проміжок часу тіло може проходити різну відстань. Наприклад, у подорож одночасно однією і тією ж трасою вирушають автомобіліст, мотоцикліст, велосипедист і бігун (мал. 4.2).

До одного й того ж місця вони прибудуть у різний час: раніше за всіх автомобіліст, а пізніше — бігун. Усі четверо рухалися однаковими траєкторіями, пройшли і проїхали однаковий шлях, здійснили однакові переміщення. Водночас їхні рухи відрізняються швидкістю.

Швидкість є просторово-часовою характеристикою руху тіла. Оскільки переміщення — величина векторна, а проміжок часу t — скалярна, то швидкість — теж величина векторна, і її напрямок на певній ділянці руху збігається з напрямком переміщення.



Мал. 4.2. Тіла рухаються з різною швидкістю

Швидкістю руху називається векторна величина, яка вимірюється відношенням переміщення до часу, за який воно було здійс-

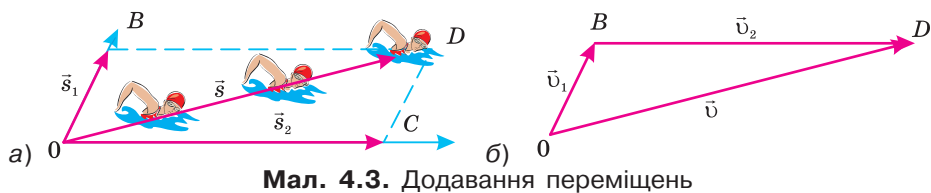
нене: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$.

За одиницю швидкості у Міжнародній системі одиниць фізичних величин (СІ) приймають сталу швидкість, з якою тіло рухається вдовж прямої і переміщується на 1 м за 1 с.

Отже, одиницею швидкості є метр за секунду, $[v] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Водночас на практиці використовують й інші одиниці її вимірювання, зокрема $1 \frac{\text{км}}{\text{год}} = \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = \frac{10 \text{ м}}{36 \text{ с}} = \frac{1 \text{ м}}{3,6 \text{ с}}$. Це означає, що для переведення швидкості з км/год у м/с необхідно її числове значення поділити на 3,6. Наприклад, $54 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 54 \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 54 \frac{1 \text{ м}}{3,6 \text{ с}} = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Розглянемо рух тіла в різних системах відліку. Нехай плавець рухається із точки O перпендикулярно течії річки і тоді його переміщення відносно води \vec{s}_1 . Нерухому систему відліку пов'яжемо з берегом (мал. 4.3).



Мал. 4.3. Додавання переміщень

Переміщення води відносно берега за той самий час становитиме \vec{s}_2 . На цю ж віддаль вода перенесе і плавця. У результаті додавання переміщення плавця відносно води та води відносно берега — плавець знаходитиметься у точці D . Його результуюче переміщення відносно системи відліку, пов'язаної із Землею, дорівнює діагоналі OD паралелограма $OBCD$, побудованого на переміщеннях \vec{s}_1 та \vec{s}_2 : $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$. (Цей спосіб додавання векторів називають правилом паралелограма.)

Отже, переміщення \vec{s} тіла в нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі його переміщення \vec{s}_1 у рухомій системі і переміщення \vec{s}_2 рухомої системи відносно нерухомої.

Це ж правило пов'язує швидкості того самого тіла у двох системах відліку. Розділивши співвідношення $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ на час руху t дістанемо:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \quad t = t_1 = t_2.$$

Це означає, що

швидкість тіла \vec{v} у нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі швидкості \vec{v}_1 тіла в рухомій і швидкості \vec{v}_2 рухомої системи відносно нерухомої.

Якщо відомо вектор переміщення тіла \vec{s} і координати його початкового положення, то можна також визначити координати наступного положення тіла.

На мал. 4.5 показано проєкції переміщення та швидкості на вісь OX . Зміна координат тіла під час його руху вздовж прямої чисельно дорівнює переміщенню тіла вздовж осі

$$s_x = x - x_0.$$

Розглянемо, як визначаються координати наступного положення тіла, якщо відомо координати його початкового положення і вектор переміщення. Нехай тіло здійснило переміщення \vec{s} (мал. 4.6). На малюнку зображено таке переміщення точки, за якого координати x і y збільшуються. Проєкції вектора \vec{s} на осі координат — додатні ($s_x > 0$; $s_y > 0$).

Координати початкового положення тіла — $A(x_0, y_0)$, а наступного — $B(x, y)$. З малюнка видно, що $x = x_0 + s_x$, а $y = y_0 + s_y$.

Нагадаємо, що у випадку, коли вектор перпендикулярний до осі, його початкові й кінцеві координати є однаковими, наприклад $x = x_0$, тому проєкція вектора на вісь: $s_x = x - x_0 = 0$.

У різних системах відліку проєкція переміщення тіла в нерухомій системі, наприклад на вісь x (s_x) дорівнює сумі проєкцій переміщення s_{x_1} та s_{x_2} : $s_x = s_{x_1} + s_{x_2}$. Аналогічно проєкція швидкості на вісь OX визначається як $v_x = v_{x_1} + v_{x_2}$.

! Головне в цьому параграфі

Шлях — це довжина ділянки траєкторії, яку тіло проходить за певний проміжок часу.

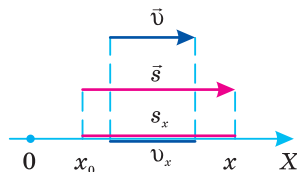
Переміщенням називають вектор, який сполучає початкове а кінцеве положення тіла, і спрямований із початкової точки руху в кінцеву.

Швидкістю руху називається векторна величина, що визначається відношенням переміщення до часу, за який це переміщення було здійснене.

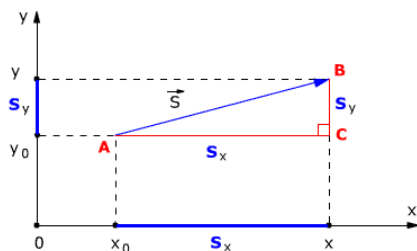
$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

У СІ одиницею швидкості є метр за секунду, $[v] = 1 \frac{M}{c}$.

Залежність швидкості, переміщення, координати і шляху під час прямолінійного рівномірного руху є лінійною.



Мал. 4.5. Проєкції переміщення і швидкості на вісь OX



Мал. 4.6. Зв'язок між проєкцією вектора переміщення і зміною відповідної координати

Переміщення \vec{s} і швидкість тіла \vec{v} — векторні величини.

Швидкість тіла \vec{v} у нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі швидкості \vec{v}_1 тіла в рухомій системі відліку і швидкості \vec{v}_2 рухомої системи відносно нерухомої.

Проекція переміщення тіла у нерухомій системі відліку дорівнює сумі проекцій переміщення s_{x_1} та переміщення s_{x_2} : $s_x = s_{x_1} + s_{x_2}$.

Проекція швидкості на вісь x визначається як $v_x = v_{x_1} + v_{x_2}$.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке шлях?
2. Що таке переміщення?
3. Що називають швидкістю руху тіла?
4. Як визначити координати наступного положення тіла, якщо відомо координати його початкового положення і вектор переміщення?

§ 5. Рівномірний прямолінійний рух

- ▶ Рівномірний прямолінійний рух
- ▶ Графіки залежності кінематичних величин рівномірного руху від часу

РІВНОМІРНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. Найпростішим видом механічного руху є рівномірний прямолінійний рух.

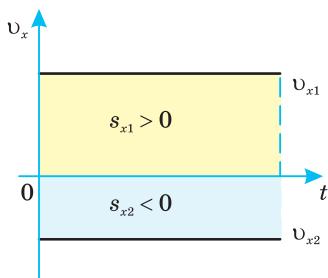
Рівномірним прямолінійним рухом матеріальної точки є такий рух, коли матеріальна точка, за будь-які рівні проміжки часу здійснює однакові переміщення.

Під час рівномірного прямолінійного руху тіло переміщується з постійною за модулем і напрямком швидкістю, тобто $\vec{v} = \text{const}$, а отже, і проекція швидкості на вісь, наприклад OX , є сталою величиною $v_x = \text{const}$.

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

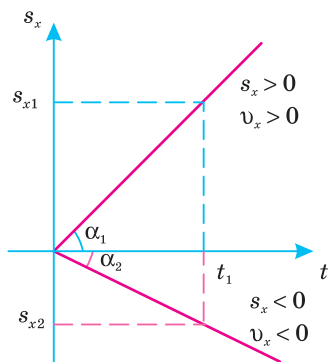
ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТІ КІНЕМАТИЧНИХ ВЕЛИЧИН РІВНОМІРНОГО РУХУ ВІД ЧАСУ. Під час знаходження числового значення переміщення, швидкості або шляху зручно застосовувати графічний метод. На будь-якому графіку відображено функціональну залежність певних фізичних величин (наприклад, швидкості від часу).

Оскільки під час прямолінійного рівномірного руху швидкість тіла не змінюється, то графіком залежності проекції швидкості є пряма, паралельна осі часу і розміщена над нею, якщо тіло рухається вздовж осі OX (проекція швидкості додатна $v_x > 0$ і під віссю — коли тіло руха-



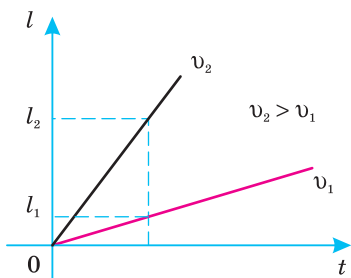
Мал. 5.1.

Графік проекції швидкості



Мал. 5.2.

Графік проекції переміщення



Мал. 5.3.

Графік шляху

ється проти вибраного напрямку осі ($v_x < 0$) (мал. 5.1).

Переміщення, що здійснило тіло, чисельно дорівнює площі фігури, утвореної графіком залежності швидкості від часу, перпендикулярами, проведеними до осі t у точках, які відповідають часу початку та закінчення спостереження за рухом тіла та віссю t (на цьому графіку переміщення чисельно дорівнює площі прямокутника) ($s_{x1} > 0, s_{x2} < 0$). Це твердження ще називають *геометричним змістом переміщення*.

Залежність переміщення від часу $s_x = s_x(t)$ під час прямолінійного рівномірного руху є прямо пропорційною, оскільки швидкість під час цього руху є сталою величиною, тобто $s = vt, s_x(t) = v_x t$.

Графічно вона зображатиметься прямою, яка проходить через початок координат (мал. 5.2).

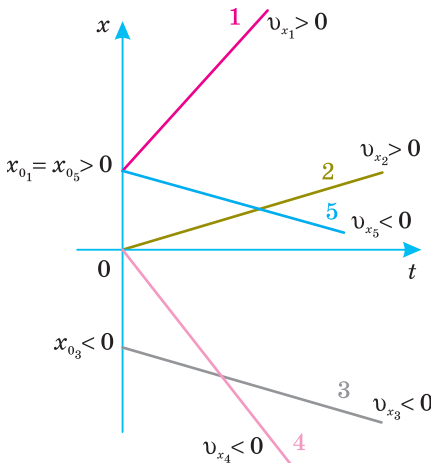
Якщо проекція переміщення набуває додатних значень ($v_x > 0$), то графік проекції переміщення напрямлений вгору, а якщо — від’ємних ($v_x < 0$), — донизу.

Під час прямолінійного рівномірного руху модуль переміщення дорівнює пройденому шляху $l = vt$, де v — модуль швидкості. Графіком такої залежності є пряма, що проходить через початок координат і завжди напрямлена вгору (шлях не може набувати від’ємних значень). Залежно від значення швидкості на-

хил прямої до осі часу буде різним: чим більша швидкість, тим більший кут між прямою (графіком) та віссю часу (мал. 5.3).

Вам відомо, що $x = x_0 + s_x$, де проекція переміщення $s_x(t) = v_x t$. Отже для рівномірного прямолінійного руху залежність координати від часу має вигляд:

$$x(t) = x_0 + v_x t,$$



Мал. 5.4.
Графіки руху тіл

де x_0 — початкова координата тіла, а v_x — проекція його швидкості. Графіком такої функціональної залежності є пряма, напрямлена під певним кутом до осі t , яка перетинає вісь ординат (x) у точці x_0 (мал. 5.4).

Пряма проходить через початок координат, коли $x_0 = 0$ або зміщена вздовж осі Ox на величину x_0 , якщо $x_0 \neq 0$. Оскільки проекція швидкості може набувати як додатних так і від’ємних значень (напрямок вектора швидкості збігається з вибраним напрямком координатної осі або протилежний йому), то графік здійснюється вгору при ($v_x > 0$) або спадає донизу при ($v_x < 0$).

Графіки прямолінійного рівномірного руху відображають залежності відповідних параметрів руху (координат, пройденого шляху, переміщення і швидкості) від часу. За їх допомогою можна з’ясувати характер руху тіла і зміни відповідних величин з плином часу. Оскільки графіком лінійної функціональної залежності (наприклад, швидкості, переміщення, координати і шляху) є пряма лінія, то для його побудови достатньо визначити дві точки, що відповідають певним моментам часу, і провести через них пряму.

Приклад розв’язування графічної задачі

Задача. Користуючись графіками руху двох тіл (мал. 5.5):

1. Визначити:
 - а) швидкості тіл;
 - б) рівняння їхнього руху;
 - в) модуль переміщення за 4 с;
 - г) час та місце зустрічі;
 - д) відстань між тілами через 2 с після початку руху.
2. Побудувати графіки проєкцій швидкості і переміщення та шляху за 4 с руху.

Розв’язок

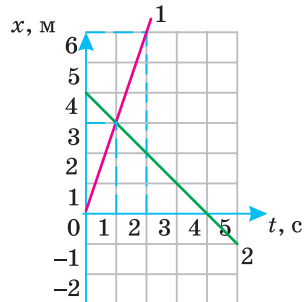
а) Швидкість визначаємо за формулою

$$v_x = \frac{x - x_0}{t}$$

Інтервал часу зміни координати ви-

бираємо довільно, спрощуючи обчислення. Наприклад, візьмемо $t = 2$ с. Перше тіло через 2 с руху мало координату $x = 6$ при $x_0 = 0$, тому проєкція швидкості $v_{x1} = (6 \text{ м} - 0 \text{ м}) / (2 \text{ с}) = 3 \text{ м/с}$;

$$v_{x1} = 3 \text{ м/с}.$$



Мал. 5.5.

Для другого тіла $x_0 = 4$ м, а через $t = 2$ с, $x = 2$ м, тобто $v_{x_2} = (2 \text{ м} - 4 \text{ м}) / (2 \text{ с}) = -1 \text{ м/с}$; $v_{x_2} = -1 \text{ м/с}$.

б) Записуємо рівняння руху для цих тіл, виходячи з його загального вигляду $x = x_0 + v_x t$. Для першого тіла $x_1 = 3t$. Для другого — $x_2 = 4 - t$.

в) Визначаємо модуль переміщення за $t = 4$ с, користуючись формулою $s_x = v_x t$.

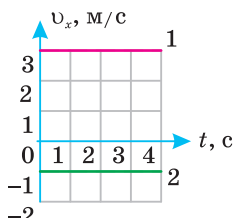
$$s_{x_1} = 3t; s_{x_1} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 4 \text{ с} = 12 \text{ м}.$$

$$s_{x_2} = -1t; s_{x_2} = (-1) \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 4 \text{ с} = -4 \text{ м}.$$

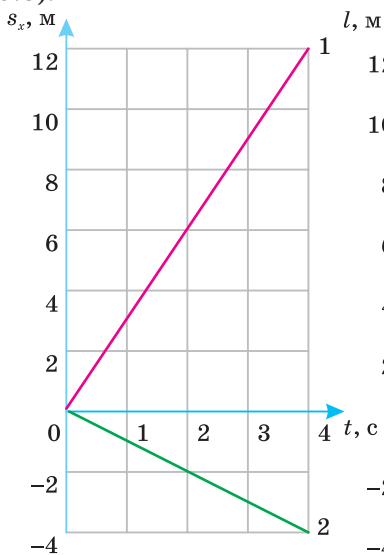
г) Визначаємо час і місце зустрічі. Для цього з точки перетину графіків руху двох тіл опускаємо перпендикуляр на вісь t і одержуємо час зустрічі 1 с. Перпендикуляр, опущений на вісь OX , укаже координату зустрічі 3 м.

д) Через 2 с перше тіло матиме координату 6 м, а друге — 2 м. Відстань між тілами $l = x_1 - x_2 = 4$ м.

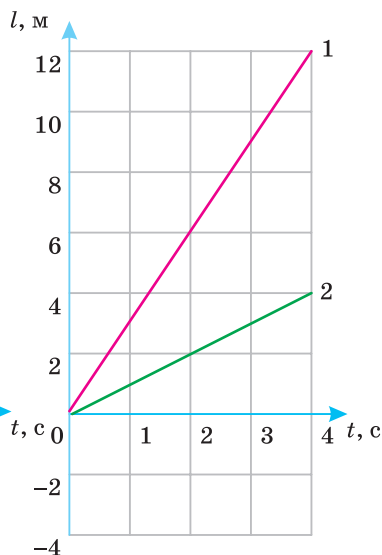
2. Використовуючи одержані результати, виконаємо відповідні побудови (мал. 5.6—5.8):



Мал. 5.6. Графіки проєкцій швидкостей



Мал. 5.7. Графіки проєкцій переміщень



Мал. 5.8. Графіки шляху

! Головне в цьому параграфі

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

Геометричний зміст переміщення: переміщення, що здійснило тіло чисельно дорівнює площі фігури, утвореної графіком залежності швидкості від часу, перпендикулярами, проведеними до осі t у точках, які відповідають часу початку та закінчення спостереження за рухом тіла і віссю t ($s_{x_1} > 0$, $s_{x_2} < 0$).

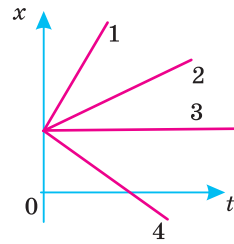
З метою побудови заданого графіка прямолінійного рівномірного руху достатньо визначити дві точки, що відповідають певним моментам часу, і провести через них пряму.

? Запитання для самоперевірки

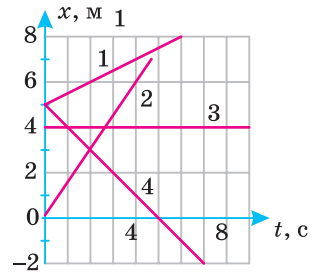
1. Чи можна визначити кінцеве положення тіла, якщо відомі його початкове положення і довжина пройденого шляху?
2. Чим відрізняється графік шляху від графіка проекції переміщення?
3. Графік руху перетинає вісь часу: що це означає?
4. Чи можуть зменшуватись із часом координата рухомої точки і пройдений шлях?
5. Від чого залежить нахил прямої лінії до осі часу кожної з кінематичних величин (швидкості, переміщення, координати та шляху)?
6. Швидкість тіла під час прямолінійного руху з пункту A в пункт B у два рази більша від швидкості його руху у зворотному напрямку. Побудуйте графіки залежності від часу: а) координати; б) швидкості; в) шляху.

Вправа до § 5

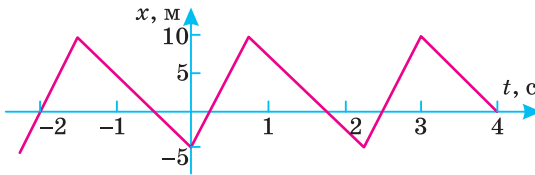
- 1 (с). На мал. 5.9 наведено графіки руху чотирьох тіл уздовж осі OX . Що спільного в усіх цих рухів? Чим вони відрізняються?
- 2 (д). Із двох точок A і B , які знаходяться на відстані 90 м одна від одної, одночасно в одному напрямку почали рухатися два тіла. Тіло, що рухається з точки A , має швидкість 5 м/с, а з точки B — 2 м/с. Через який час перше тіло наздожене друге? Які переміщення здійснюють тіла? Розв'яжіть задачу аналітичним і графічним способами. Відповіді порівняйте.
- 3 (д). За наведеними на мал. 5.10 графіками опишіть рухи. Для кожного з них визначте модуль і напрямок швидкості, запишіть формулу $x(t)$ і побудуйте відповідні графіки.
- 4 (д). Рівняння руху вантажного автомобіля має вигляд: $x_1 = -270 + 12t$, а рівняння руху пішохода, який іде узбіччям того самого шосе — $x_2 = -1,5t$. (Величини задано в СІ.) Накресліть графіки руху і визначте: а) положення автомобіля і пішохода в момент початку спостереження; б) з якими швидкостями і в якому напрямку вони рухалися; в) коли і де вони зустрілися.
- 5 (д). За графіком залежності координати від часу (мал. 5.11) побудуйте графік залежності швидкості від часу.
- 6 (в). На мал. 5.12 подано графіки, які характеризують рух пішохода. Побудуйте на їх основі графік залежності $v_x(t)$.



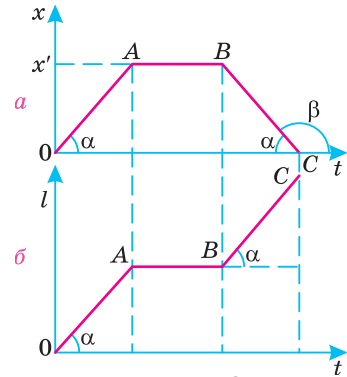
Мал. 5.9



Мал. 5.10



Мал. 5.11.



Мал. 5.12.

§ 6. Рівнозмінний рух

- ▶ Рівнозмінний рух
- ▶ Швидкість рівнозмінного руху
- ▶ Прискорення

РІВНОЗМІННИЙ РУХ. У природі рівномірний прямолінійний рух зустрічається порівняно рідко. Рівномірно і прямолінійно тіла рухаються лише на невеликих ділянках траєкторії. Більш поширеним є нерівномірний рух тіла, під час якого миттєва швидкість тіла безперервно змінюється. Для спрощення аналізу явищ руху серед безлічі нерівномірних рухів виокремлюють рівнозмінний рух, під час якого швидкість тіла за будь-які однакові інтервали часу змінюється однаково (на одну й ту саму величину).

Рівнозмінним називають такий рух, у якому за будь-які рівні інтервали часу швидкість змінюється однаково.

Під рівнозмінним рухом розуміють як рівноприскорений, так і рівносповільнений рухи.

ШВИДКІСТЬ РІВНОЗМІННОГО РУХУ. Для характеристики нерівномірного руху вводять поняття середньої і миттєвої швидкостей. Під час опису швидкості користуються такими фізичними величинами:

- 1) середньої швидкості (швидкість здійснення переміщення):

Середньою швидкістю називають векторну величину, яка визначається відношенням переміщення до інтервалу часу, упродовж якого відбулося це переміщення.

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \vec{s}_3 + \dots + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n},$$

де $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \dots, \vec{s}_n$ — переміщення тіла за відповідні інтервали часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$;

2) середньої швидкості проходження шляху (середньої шляхової швидкості).

Середньою швидкістю проходження шляху називають скалярну величину, яка дорівнює відношенню пройденого шляху до інтервалу часу руху тіла.

$$v_c = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n},$$

де $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ — ділянки шляху, пройдені за відповідні інтервали часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

З формул видно, що середня швидкість проходження шляху не є середнім арифметичним. Її обчислюють як відношення відповідних середніх сум шляху до відповідних сум інтервалів часу.

Для прикладу розглянемо задачу.

Задача. Велосипедист їхав з пункту A у пункт B так, що третину часу він рухався з середньою швидкістю 9 км/год, а решту часу (через прокол шини) вів велосипед, ідучи пішки зі швидкістю 3 км/год (мал. 6.1). Визначте середню швидкість руху велосипедиста на всьому шляху.

Дано:

$$v_1 = 9 \text{ км/год}$$

$$v_2 = 3 \text{ км/год}$$

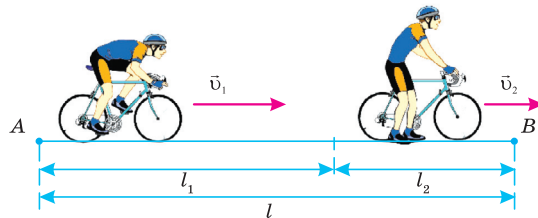
$$t_1 = t/3$$

$$t_2 = 2t/3$$

$v_c = ?$

Розв'язок

За умовою задачі треба знайти середню швидкість проходження шляху. Пов'яжемо систему відліку з дорогою.



Мал. 6.1

Рух велосипедиста у цілому був нерівномірним, але таким, що на різних ділянках шляху середні швидкості були різними. Рівняння руху на цих ділянках l_1 та l_2 матимуть вигляд: $l_1 = v_1 t_1$ та $l_2 = v_2 t_2$. За умовою задачі $t_1 = t/3$, $t_2 = 2t/3$, де t — загальний час руху на шляху $l = l_1 + l_2$.

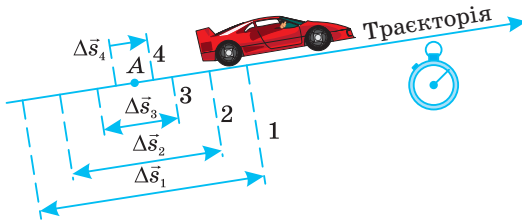
За означенням середньої швидкості $v_c = \frac{l}{t}$ знайдемо пройдений велосипедистом шлях:

$$l = l_1 + l_2 = v_1 t_1 + v_2 t_2 = v_1 \frac{t}{3} + v_2 \frac{2t}{3} = \frac{t}{3} (v_1 + 2v_2).$$

$$v_c = \frac{l}{t} = \frac{\frac{t}{3} (v_1 + 2v_2)}{t} = \frac{v_1 + 2v_2}{3}.$$

Підставивши числові значення одержимо 5 км/год.

Відповідь: 5 км/год.



Мал. 6.2.

Елементи переміщення $\vec{\Delta s}$ «стягують» у точку A



Мал. 6.3. Шкала

спідометра автомобіля — приладу для вимірювання модуля миттєвої швидкості

Зверніть увагу! Одержаний результат середньої шляхової швидкості є не середнім арифметичним для цих швидкостей, а відношенням пройденого шляху до часу, за який цей шлях було пройдено.

Під час руху тіла в кожній точці траєкторії і в кожний момент часу швидкість має певне значення. Цю швидкість називають миттєвою.

Миттєвою швидкістю називають швидкість тіла у певний момент часу у певній точці траєкторії.

Як обчислити величину і напрям миттєвої швидкості? Для визначення її чисельного значення необхідно брати переміщення $\vec{\Delta s}$ за такий малий інтервал часу Δt , за який швидкість можна вважати практично незмінною. При цьому траєкторія руху тіла наближається до точки. На мал. 6.2 схематично показано процес «стягування» елементів переміщення $\vec{\Delta s}$ у точку A , в якій визначають миттєву швидкість.

Тоді миттєва швидкість у цій точці траєкторії дорівнює відношенню дуже малого переміщення $\vec{\Delta s}$ до дуже малого інтервалу часу Δt , за який це переміщення відбулося: $\vec{v} = \frac{\vec{\Delta s}}{\Delta t}$ за умови, що $\Delta t \rightarrow 0$.

Наочне уявлення про значення миттєвої швидкості автомобіля дає спідометр — прилад для вимірювання модуля швидкості (мал. 6.3).

Навіть за умови, що модуль швидкості тіла залишається незмінним, його швидкість — як векторна величина — змінюється, оскільки вона змінюється за напрямом. Врахуйте це, бо згодом ми побачимо, що будь-яка зміна швидкості тіла, зокрема за напрямом, зумовлена дією на це тіло інших тіл.

ПРИСКОРЕННЯ. Для обчислення швидкості нерівномірного прямолінійного руху тіла у будь-який момент часу потрібно знати, як швидко вона змінюється, або, інакше кажучи, як змінюється швидкість за одиницю часу.

Фізичною величиною, яка характеризує зміну швидкості з часом, є прискорення.

Прискоренням називається векторна фізична величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості до інтервалу часу, за який ця зміна відбулася.

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

Нехай у загальному випадку руху тіла в момент часу t_0 воно рухалося зі швидкістю \vec{v}_0 , а в момент t — зі швидкістю \vec{v} . Тоді прискорення руху тіла \vec{a} буде дорівнювати:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0}.$$

Або, коли $t_0 = 0$:

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

Оскільки зміна швидкості $\Delta \vec{v}$ — величина векторна, тому і прискорення \vec{a} — величина векторна. Напрямок вектора прискорення збігається з напрямком вектора різниці швидкостей $\Delta \vec{v}$.

За одиницю прискорення в СІ прийнято брати прискорення такого рівнозмінного руху, під час якого швидкість руху тіла за кожну секунду

змінюється на один метр за секунду: $[a] = \frac{1 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

У процесі руху швидкість тіла може збільшуватися або зменшуватися. Відповідно, рівнозмінний рух може бути рівноприскореним, коли швидкість тіла з часом зростає, а також рівносповільненим, коли швидкість тіла з часом зменшується. Проте у фізиці прийнято називати обидва рухи рівноприскореними (при цьому розуміють, що рівносповільнений рух — це теж рух із прискоренням, але від'ємним).

Наприклад, коли автомобіль набирає швидкість, його прискорення спрямоване у той самий бік, що й вектор швидкості, а коли він гальмує, то його прискорення спрямоване протилежно до напрямку швидкості.

У фізиці термін «прискорення» стосується будь-якої зміни швидкості, зокрема, й тоді, коли швидкість змінюється тільки за напрямком. Тому з прискоренням рухається не тільки автомобіль, який розганяється або гальмує, а й автомобіль, який рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Швидкість автомобіля змінюється за напрямком, а його прискорення спрямоване перпендикулярно до швидкості — по радіусу до центра кола.

Для вимірювання прискорення використовують спеціальні прилади — акселерометри різної конструкції. У природі та техніці тіла рухаються з різними прискореннями. Наприклад, прискорення електропоїзду становить $0,6 \text{ м/с}^2$, вільного падіння тіла — $9,8 \text{ м/с}^2$, ракети під час запуску супутника — 60 м/с^2 , кулі у стволі автомата — 800 м/с^2 .

! Головне в цьому параграфі

Рівнозмінним називають такий рух, у якому за будь-які рівні інтервали часу швидкість змінюється однаково.

Середньою швидкістю називають векторну величину, яка визначається відношенням переміщення до інтервалу часу, упродовж якого відбулося це переміщення:

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \vec{s}_3 + \dots + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n},$$

де $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \dots, \vec{s}_n$ — переміщення тіла за відповідні інтервали часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$;

Середньою швидкістю проходження шляху називають скалярну величину, яка дорівнює відношенню пройденого шляху до інтервалу часу руху тіла:

$$v_c = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n},$$

де l_1, l_2, l_3 — ділянки шляху, пройдені за відповідні інтервали часу t_1, t_2, t_3, t_n .

Миттєвою швидкістю називають швидкість тіла у певний момент часу в певній точці траєкторії.

Прискоренням називається векторна фізична величина, яка дорівнює відношенню зміни швидкості до інтервалу часу, впродовж якого ця зміна відбулася

$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Одиниця прискорення в СІ: $[a] = \frac{1 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

? Запитання для самоперевірки

1. Який рух називають рівнозмінним?
2. Сформулюйте визначення середньої швидкості.
3. Що називають миттєвою швидкістю? Як напрямлена миттєва швидкість?
4. Чи може миттєва швидкість бути більшою або меншою за середню?
5. Що таке прискорення? Назвіть одиниці вимірювання прискорення.
6. Як спрямовується прискорення відносно швидкості тіла? Наведіть приклади, які підтвердять вашу відповідь.

Вправа до § 6

- 1(п). Що показує модуль вектора прискорення?
- 2(п). За якої умови модуль вектора швидкості тіла, що рухається, збільшується? Зменшується?
- 3(п). Потяг починає гальмувати. Як спрямовані його прискорення і швидкість?
- 4(с). Автомобіль проїхав 60 км за 1 год, а потім ще 240 км за 3 год. Чому дорівнює середня швидкість на всьому шляху?
- 5(с). Автомобіль з місця починає рухатися рівноприскорено. Через 1 хв він розвиває швидкість 54 км/год. Визначте його прискорення.

- 6(с).** З яким прискоренням рухається автомобіль, якщо його швидкість за 1 хв змінилася з 9 до 54 км/год?
- 7(д).** Літак торкається посадочної смуги при швидкості 60 м/с і зупиняється, через 1,8 км. Чому дорівнює швидкість літака у момент, коли він перемістився по смугі на 550 м?
- 8(д).** Куля пробиває дошку товщиною 2 см. Швидкість кулі до влучання в дошку 500 м/с і 100 м/с після вильоту з неї. Чому дорівнює прискорення кулі та час руху в дошці? Рух кулі в дошці вважати рівносповільненим.
- 9(в).** Відстань між двома станціями поїзд пройшов із середньою швидкістю 72 км/год. Розгін і гальмування тривали 4 хв, а решту часу потяг рухався рівномірно зі швидкістю 80 км/год. Визначте час рівномірного руху поїзда?
- 10(в).** Велосипедист їхав з одного міста до другого. Половину шляху він проїхав зі швидкістю 12 км/год. Далі половину часу руху, що залишився, він їхав зі швидкістю 6 км/год, а потім до кінця шляху йшов пішки зі швидкістю 4 км/год. Визначте середню швидкість руху велосипедиста на всьому шляху.

§ 7. Рівноприскорений прямолінійний рух

- ▶ *Рівноприскорений прямолінійний рух*
- ▶ *Графіки залежності кінематичних величин рівноприскореного прямолінійного руху від часу*

РІВНОПРИСКОРЕНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. Прикладом рівнозмінного руху тіла є рівноприскорений прямолінійний рух. Його миттєву швидкість можна визначити з формули $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, тобто:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \text{ або } v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Для обчислення переміщення підставимо вираз для миттєвої швидкості у формулу обчислення середньої швидкості $\vec{s} = \vec{v}_c t = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} t$. Отримаємо рівняння рівноприскореного прямолінійного руху:

$$\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}_0 + \vec{a}t}{2} t \Rightarrow \vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

Ви вже знаєте, що для виконання обчислень векторні рівняння треба записувати у проекціях на обрані осі. У проекціях на вісь OX рівняння для обчислення переміщення матиме такий вигляд:

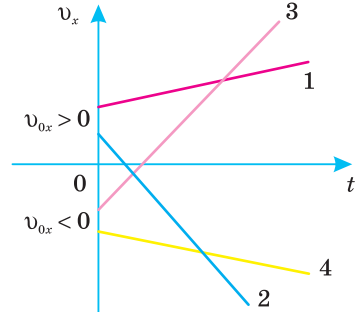
$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

За умови, коли початкова швидкість v_0 дорівнює 0, рівняння переміщення спрощується: $\vec{s} = \frac{\vec{a}t^2}{2}$, або в проекціях на обрану вісь OX : $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$.

ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТІ КІНЕМАТИЧНИХ ВЕЛИЧИН РІВНОПРИСКОРЕНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ ВІД ЧАСУ. Як було встановлено, формула $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ є законом зміни миттєвої швидкості рівнозмінного руху тіла і дає можливість визначати швидкість \vec{v} у будь-який момент часу t .

З неї видно, що миттєва швидкість прискореного руху лінійно залежить від часу t , а її графіком є пряма лінія.

Графіки проекції швидкості рівноприскореного руху мають вигляд, показаний на мал. 7.1. Прямі 1, 3 на цьому малюнку відповідають рухові з додатним прискоренням (швидкість зростає), прямі 2, 4 — рухові з від’ємним прискоренням.



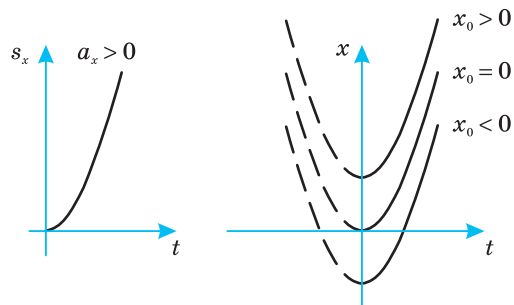
Мал. 7.1. Графіки проекції швидкості рівноприскореного руху

Наведені графіки стосуються випадку, коли в момент часу $t = 0$ тіло мало початкову швидкість v_0 , $v_{x1} < v_{x3}$, $v_{x2} = v_{x4}$.

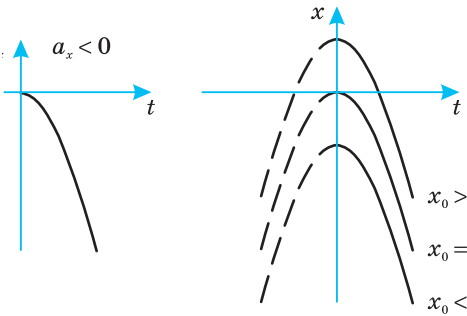
Графік проекції переміщення та координати. Проекція переміщення тіла на вісь OX та координати тіла визначаються відповідно за формулами $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ і $x = x_0 + s_x$ тобто, $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$. Отже, кінематичні рівняння переміщення та координати є квадратними рівняннями виду $y = a + bx + cx^2$. Тому графіками залежності проекції переміщення та координати від часу є параболи, гілки яких згідно з параметрами руху мають різний вигляд.

Зверніть увагу! Відмінністю графіків залежності переміщення та координати від часу є лише те, що вершина параболи графіка переміщення завжди знаходиться у точці з координатою $t = 0, s_x = 0$. Вершина параболи графіка координати від часу завжди знаходиться у точці $t = 0, x = x_0$, тобто на осі OX вище або нижче початку координат залежно від значення початкової координати x_0 .

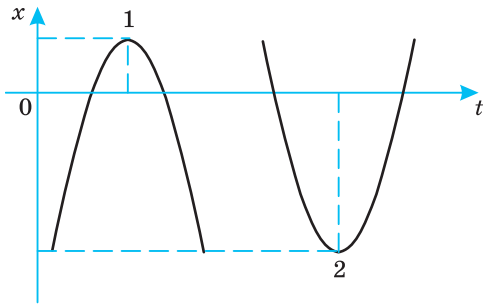
Якщо $v_{0x} = 0$ і $a_x > 0$, то графіки мають вигляд, зображений на мал. 7.2.



Мал. 7.2. Графік проекції переміщення і координати при $v_{0x} = 0$ і $a_x > 0$



Мал. 7.3. Графік проекції переміщення і координати при $v_{0x} = 0$ і $a_x < 0$



Мал. 7.4. Графік проекції переміщення і координати:
1) $v_{0x} > 0$, $a_x < 0$; 2) $v_{0x} < 0$, $a_x > 0$

Якщо $v_{0x} = 0$ і $a_x < 0$, то гілки параболи зорієнтовані донизу (мал. 7.3).

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

$$x = x_0 - \frac{v_0^2}{2a}, \quad t = -\frac{v_0}{a} \quad (\text{мал. 7.4}).$$

Приклад розв'язування графічної задачі на рівноприскорений прямолінійний рух

Задача. На мал. 7.5 подано графіки швидкості руху п'яти тіл.

- 1) Охарактеризувати рух кожного тіла і записати для них залежності швидкості від часу.
- 2) Записати залежності проекцій переміщення на вісь OX від часу.
- 3) Побудувати графіки залежності проекцій переміщення від часу для цих тіл.

Розв'язок

1) Тіло 1 за 6 с змінює свою швидкість від 6 м/с до 0, рухаючись із прискоренням $a_1 = \frac{0 - 6 \text{ м/с}}{6 \text{ с}} = -1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Рівняння швидкості: $v_1 = 6 - t$.

Тіло 2 має початкову швидкість $v_{02} = 4 \text{ м/с}$, протягом 6 с його швидкість не змінюється, тобто рух рівномірний: $a_2 = 0$; $v_2 = 4 \text{ м/с}$.

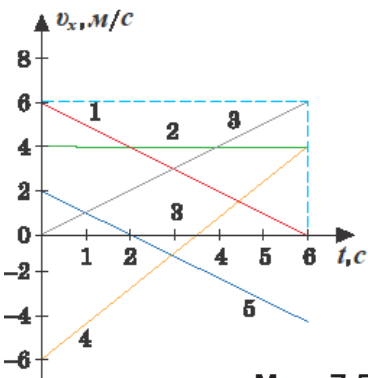
Тіло 3 має початкову швидкість $v_3 = 0$, яка через 6 с дорівнює 6 м/с, отже, тіло рухається з прискоренням:

$$a_3 = \frac{6 \text{ м/с} - 0}{6 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Рівняння швидкості: $v_3 = t$.

Тіло 4 за 6 с змінює свою швидкість від -6 м/с до 4 м/с . Отже, його прискорення:

$$a_4 = \frac{4 \text{ м/с} - (-6) \text{ м/с}}{6 \text{ с}} \approx 1,67 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$



Мал. 7.5

Рівняння швидкості:

$$v_4 = -6 + 1,67t.$$

Тіло 5 за 6 с змінює свою швидкість від 2 м/с до -4 м/с. Прискорення:

$$a_5 = \frac{-4 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{6 \text{с}} = -1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Рівняння швидкості:

$$v_5 = 2 - t.$$

2) Рівняння проекції переміщення у загальному випадку має вигляд

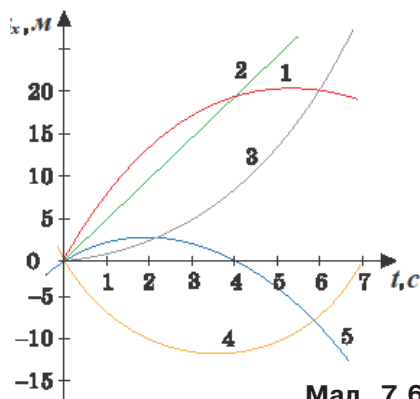
$$s_x = v_x t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Для кожного тіла від-

повідно:

$$s_{x_1} = 6t - 0,5t^2; s_{x_2} = 4t; s_{x_3} = 0,5t^2; s_{x_4} = -6t + 0,83t^2; s_{x_5} = 2t - 0,5t^2.$$

3) За визначеними рівняннями будемо графіки залежності проекції переміщення тіл від часу (мал. 7.6).



Мал. 7.6

! Головне в цьому параграфі

Миттєва швидкість рівноприскореного прямолінійного руху визначається за формулою:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad \text{або} \quad v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Рівноприскорений прямолінійний рух описується рівнянням:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad \text{або} \quad s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Графіками залежності проекції переміщення та координати від часу є параболи, гілки яких згідно з параметрами руху мають різний вигляд.

? Запитання для самоперевірки

1. Який рух називають рівномірним, а який — рівноприскореним?
2. Як залежить проекція швидкості від часу прямолінійного рівноприскореного руху?
3. Як залежить проекція переміщення від часу прямолінійного рівноприскореного руху?
4. У яких випадках графік проекції швидкості рівнозмінного руху здійсмається вгору, а в яких він спадає? Що означає перетин графіком проекції швидкості осі часу?

Вправа до § 7

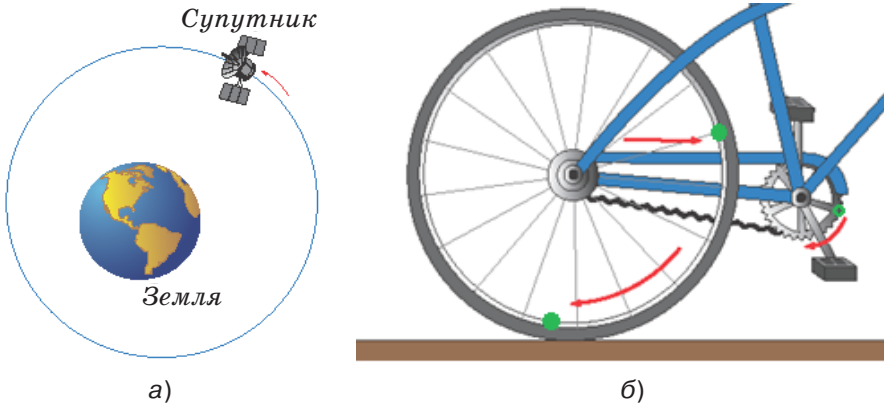
- 1 (с). Залежність швидкості від часу у момент розгону автомобіля задано рівнянням: $v = 0,8t$. Побудуйте графік швидкості і визначте швидкість наприкінці п'ятої секунди.
- 2 (д). Швидкість потяга за 20 с зменшилася з 72 до 54 км/год. Запишіть формулу залежності швидкості від часу і побудуйте графік цієї залежності.

- 3 (д). Рівняння руху матеріальної точки має вигляд: $x = 0,4t^2$. Напишіть залежність $v_x(t)$ і побудуйте її графік. Заштрихуйте на графіку площу, яка чисельно дорівнює шляху, пройденому точкою за 4 с, і обчисліть цей шлях.
- 4 (д). Рухи матеріальних точок задано такими рівняннями:
 а) $x_1 = 10t + 0,4t^2$; б) $x_2 = 2t - t^2$; в) $x_3 = -4t + 2t^2$; г) $x_4 = -t - 6t^2$. Напишіть залежність $v = v(t)$ для кожного випадку; побудувати графіки цих залежностей; визначте вид руху в кожному випадку.

§ 8. Рівномірний рух по колу

- ▶ *Кутове переміщення. Кутова швидкість*
- ▶ *Період обертання. Частота обертання*
- ▶ *Лінійна швидкість руху тіла*
- ▶ *Доцентрове прискорення*

КУТОВЕ ПЕРЕМІЩЕННЯ, КУТОВА ШВИДКІСТЬ. Одним із поширених рухів у природі та техніці є рух по колу. Прикладами руху тіла по колу є рух планет навколо Сонця, рух Місяця навколо Землі та супутників по колових орбітах, (мал. 8.1, а), рух будь-якої точки на тілі, що обертається (мал. 8.1, б).

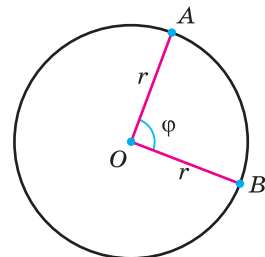


Мал. 8.1.

а) рух штучного супутника навколо Землі; б) рух точок обода колеса

Нехай матеріальна точка рівномірно рухається по колу радіуса R і в момент часу t перебуває в точці A , а в момент часу t_2 зайняла положення B (мал. 8.2).

Радіус R , проведений з центра кола до матеріальної точки за час $\Delta t = t_2 - t_1$ повернувся кут



Мал. 8.2.

Кутове переміщення φ

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ (грец. літера «фі»). Цей кут називають кутовим переміщенням.

Кутове переміщення тіла в системі одиниць СІ вимірюють у радіанах. Його скорочене позначення — 1 рад. Нагадаємо, що кут 360° становить 2π рад.

Характеристикою руху тіла по колу є кутова швидкість ω .

Кутовою швидкістю називають фізичну величину, яка визначається відношенням кутового переміщення $\Delta\varphi$ до інтервалу часу Δt , впродовж якого це переміщення відбулося: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ (ω — читається — «омега»).

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

Рух, під час якого матеріальна точка рухається по колу з незмінною кутовою швидкістю, називають рівномірним рухом по колу.

ПЕРІОД ОБЕРТАННЯ. ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ. Окрім кутової швидкості, для опису руху тіла по колу часто використовують такі величини, як період і частота обертання.

Періодом обертання називають час, впродовж якого тіло здійснює один повний оберт по колу.

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

де N — число повних обертів, зроблених за час t .

Частотою обертання називають величину, що чисельно дорівнює кількості обертів за одиницю часу.

Частоту обертання прийнято позначати грецькою літерою n : $n = \frac{N}{t}$.

За одиницю частоти в СІ прийнято 1 оберт за секунду: 1 об/с або 1 с^{-1} . Легко помітити, що період і частота — величини взаємно обернені:

$$n = \frac{1}{T} \quad T = \frac{1}{n}.$$

Кутове переміщення φ тіла за період T дорівнює 2π . Тому кутова швидкість буде $\omega = \frac{2\pi}{T}$, або, врахувавши, що $T = \frac{1}{n}$, одержимо: $\omega = 2\pi n$.

ЛІНІЙНА ШВИДКІСТЬ РУХУ ТІЛА. До руху тіла по колу застосовують і поняття швидкості, яке було введено для характеристики прямолінійного руху. У випадку руху тіла по колу цю швидкість називають лінійною.

Лінійна швидкість тіла, що рухається по колу, залишаючись незмінною (сталою) за модулем, неперервно змінюється за напрямом і в будь-якій точці спрямована по дотичній до траєкторії (мал. 8.3).

Це можна спостерігати, коли маленькі частинки відділяються від точильного диска, що обертається. Тоді вони летять по дотичній до диска, оскільки мають у момент відриву швидкість, що дорівнює швидкості точок на околі диска (мал. 8.3, а). Аналогічно шматки землі з-під коліс автомобіля летять по дотичній до обода коліс (мал. 8.3, б).

Оскільки модуль лінійної швидкості сталий, то його можна обчислити за формулою: $v = \frac{l}{t}$. За один оберт (тобто, коли $t = T$) тіло пройде відстань,

яка дорівнює довжині кола: $s = 2\pi R$, де R — радіус кола. Звідси:

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

або, враховуючи, що $T = \frac{1}{n}$,

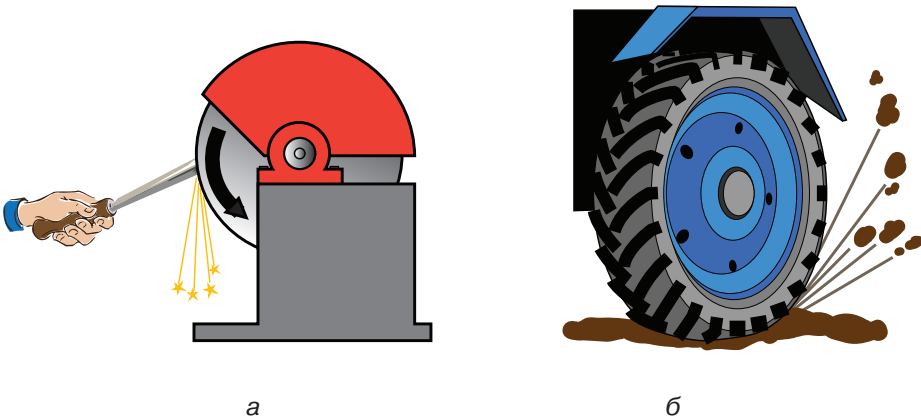
$$v = 2\pi Rn.$$

Знайдемо співвідношення між лінійною швидкістю v та кутовою ω :

$$\frac{v}{\omega} = \frac{2\pi Rn}{2\pi n}, \text{ звідки:}$$

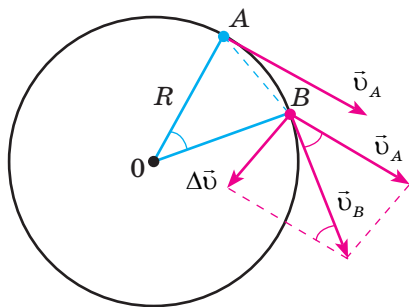
$$v = \omega R$$

З цієї формули видно, що чим далі розміщена точка тіла від осі, тим більша її лінійна швидкість.



Мал. 8.3.

- а) Частинки від точильного диска летять по дотичній до обода диска;
б) частинки землі — по дотичній до обода коліс



Мал. 8.4. Визначення прискорення у криволінійному русі

ДОЦЕНТРОВЕ ПРИСКОРЕННЯ. Під час рівномірного руху тіла по колу його лінійна швидкість, залишаючись незмінною за модулем, неперервно змінюється за напрямом. Зміна швидкості за напрямом свідчить про те, що і під час рівномірного руху тіла по колу є прискорення, яке зумовлює зміни напрямку швидкості. Це прискорення одержало назву доцентрового, оскільки воно спрямоване до центра кола по якому рухається тіло. Щоб одержати формулу для його обчислення, скористаємось уже

відомим вам способом визначення прискорення: $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, або в скалярній

формі: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$.

Нехай тіло, що рівномірно рухається по колу, у момент часу t перебувало в точці A (мал. 8.4), а через дуже малий інтервал часу Δt перемістилось у дуже близько розміщену точку B .

Швидкість у точці A позначимо \vec{v}_A , а в точці B — \vec{v}_B . Оскільки рух рівномірний, то модулі швидкості в цих точках рівні. Щоб знайти швидкість за час Δt , віднімемо (за правилом трикутника) від вектора \vec{v}_B вектор \vec{v}_A :

$$\vec{v}_B - \vec{v}_A = \Delta \vec{v}.$$

Для цього перенесемо вектор \vec{v}_A у точку B , зберігши його напрям; вектор $\Delta \vec{v}$ відповідає зміні швидкості. За малий інтервал часу Δt точка A переміститься на $\Delta s = AB$, що приблизно дорівнює дузі AB . Зауважимо, що при малих кутах $\Delta \varphi$ дуга AB збігається з хордою AB . Щоб визначити модуль прискорення a у цій довільно обраній точці A , розглянемо трикутники AOB та BDC . Вони подібні, оскільки обидва рівнобедрені і $\angle AOB = \angle BDC$. З подібності цих трикутників можна записати:

$$\frac{CD}{AB} = \frac{BD}{OB}, \text{ або } \frac{\Delta v}{\Delta s} = \frac{v_0}{R}.$$

Але $\Delta s = v \Delta t$; а $v_A = v_B = v$. Тому $\frac{\Delta v}{v \Delta t} = \frac{v}{R}$, звідки $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}$; або $a = \frac{v^2}{R}$.

Під час рівномірного руху тіла (матеріальної точки) по колу доцентрове прискорення у будь-якій точці траєкторії перпендикулярне до лінійної швидкості й напрямлене до центра кола.

Приклад розв'язування задачі на рівномірний рух по колу

Задача. Час одного оберту Землі навколо осі дорівнює 24 год. Обчислити кутову та лінійну швидкості обертання на екваторі. Радіус Землі вважати рівним 6400 км.

Дано:

$R = 64 \cdot 10^6 \text{ м}$

$T = 86400 \text{ с}$

 $\omega = ?$ $v = ?$

Розв'язок

Обертання Землі вважатимемо рівномірним. Тоді

 $v = \omega R$, а $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Час t виразимо в секундах:

$t = 3600 \cdot 24 = 86400 \text{ (с)}$.

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \text{ рад}}{86400 \text{ с}} = 0,00007 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; v = 0,00007 \text{ с}^{-1} \cdot 64 \cdot 10^5 \text{ м} = 448 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Відповідь: } \omega = 0,00007 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; v = 448 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

! Головне в цьому параграфі

Лінійна швидкість тіла, що рівномірно рухається по колу, залишаючись незмінною (сталю) за модулем, неперервно змінюється за напрямом і в будь-якій точці спрямована по дотичній до траєкторії.

Зміна швидкості за напрямом свідчить про те, що і під час рівномірного руху тіла по колу є прискорення. Це прискорення одержало назву доцентрового, оскільки спрямоване до центра кола.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке кутове переміщення?
2. Дайте визначення періоду і частоти обертання.
3. Напишіть формулу кутової швидкості та поясніть значення величин, що до неї входять.
4. Визначте кутову швидкість секундної стрілки годинника.
5. Чим відрізняються зміни швидкості під час прямолінійного та криволінійного рухів?
6. Чи можна вважати рівномірний рух по колу рівноприскореним?
7. Якщо під час руху по колу змінюватиметься і модуль швидкості, то як це впливатиме на прискорення?

Вправа до § 8

- 1(с). За який час колесо, що має кутову швидкість 4π рад/с, зробить 100 обертів?
- 2(с). 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?
- 3(д). Хвилинна стрілка годинника у три рази довша від секундної. Обчисліть співвідношення лінійних швидкостей кінців стрілок.
- 4(д). Обчисліть доцентрове прискорення точок колеса автомобіля, які дотикаються до дороги, якщо автомобіль рухається зі швидкістю 72 км/год і при цьому частота обертання колеса становить 8 с^{-1} .
- 5(д). Яке доцентрове прискорення потяга, що рухається по заокругленню радіусом 800 м зі швидкістю 20 м/с?
- 6(д). З якою швидкістю автомобіль повинен проїжджати середину опуклого моста радіусом 40 м, щоб доцентрове прискорення дорівнювало прискоренню вільного падіння?

- 7(в).** Дві матеріальні точки рухаються по колах радіусами R_1 і R_2 , причому $R_1 = 2R_2$. Порівняйте доцентрові прискорення точок у випадках: а) коли лінійні швидкості однакові; б) коли періоди однакові.

ПРАКТИКУМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ № 1

Розв'язування фізичних задач здійснюється в декілька етапів: аналіз умови та її наочна інтерпретація у вигляді схеми, рисунка, графіка або креслення; складання рівнянь, що пов'язують фізичні величини, які кількісно характеризують досліджуване явище; розв'язування системи рівнянь відносно шуканої величини; аналіз вірогідності отриманого результату. Задачі, незалежно від способу подання даних, слід розв'язувати в загальному вигляді.

У процесі розв'язування фізичних задач із кінематики рекомендовано використовувати такий алгоритм:

1. Проаналізувати умову задачі та намалювати схему, на якій вказати траєкторію руху тіла, вектори швидкості й прискорення у визначені моменти часу.
2. Вибрати систему відліку. Початок координат зручно розміщувати в початковій точці руху, а осі OX і OY (або одну з них, якщо рух прямолінійний) направляти у напрямку початкового руху тіл.
3. Відобразити координати рухомого тіла у визначені моменти часу й спроектувати вектори швидкостей і прискорень на осі OX і OY , які зручно направляти так, щоб з метою спрощення рівнянь якнайбільше проєкцій векторів дорівнювали нулю.
4. Встановити зв'язок між фізичними величинами, позначеними на схемі, з використанням кінематичних формул для координат і проєкцій швидкостей та записати додаткові умови задачі.

Вивчаючи відносний рух двох або кількох тіл, систему відліку зручно пов'язувати з одним з них, приймаючи його за тіло відліку, і розглядати переміщення, швидкості й прискорення відносно нього.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Велосипедист виїхав з одного міста в інше. Першу половину шляху він проїхав із швидкістю $v_1 = 12$ км/год. Другу — $v_2 = 6$ км/год, а потім до місця призначення йшов пішки із швидкістю $v_3 = 4$ км/год. Визначити середню швидкість велосипедиста на всьому шляху.

Дано:

$$v_1 = 12 \text{ км/год} = 3,3 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 6 \text{ км/год} = 1,7 \text{ м/с}$$

$$v_3 = 4 \text{ км/год} = 1,1 \text{ м/с}$$

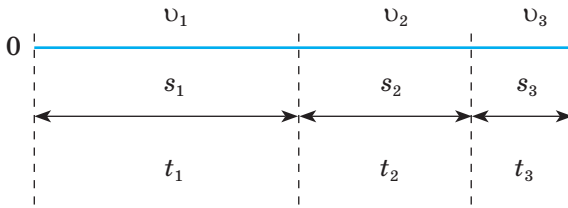
$$v_0 \text{ — ?}$$

Розв'язок

Проаналізувавши умову задачі, можна зробити висновок, що це задача на рівномірний прямолінійний рух. Намалюємо схему руху тіла: (мал. 1)

Зобразимо траєкторію руху й вибираємо на ній початок відліку (точка O). Увесь шлях розіб'ємо на три відрізки s_1 , s_2 , s_3 , на кожному з них вказуємо швидкості v_1 , v_2 , v_3 і відзначаємо час руху t_1 , t_2 , t_3 .

Складаємо рівняння руху для кожного відрізка шляху: $s_1 = v_1 t_1$; $s_2 = v_2 t_2$; $s_3 = v_3 t_3$ — і записуємо додаткові умови задачі: $s_1 = s_2 + s_3$; $t_2 = t_3$; $v_0 = (s_1 + s_2 + s_3) / (t_1 + t_2 + t_3)$. Випишемо числові значення відомих вели-



Мал. 1.

чин і, визначивши число невідомих в отриманій системі рівнянь (s_1 ; s_2 ; s_3 ; t_1 ; t_2 ; t_3 і v_c), розв'язуємо її відносно шуканої величини v_c .

Під час розв'язку системи відносно середньої швидкості одержимо $v_c = 2v_1(v_2 + v_3)/(2v_1 + v_2 + v_3)$. Підставивши числові значення в розрахункову формулу, одержимо: $v_c \approx 7$ км/год $\approx 1,9$ м/с.

Задача 2. Від буксира, що рухається проти течії річки, відірвався човен. У той момент, коли на буксирі помітили човен, він перебував від нього на відстані s_0 . З буксира швидко спустили катер, який доплив до човна й повернувся назад. Скільки часу зайняла поїздка і яку відстань катер подолав в один й інший бік, якщо швидкості катера й буксира відносно води становлять відповідно v_1 і v_2 ?

Дано:

s_0, v_1, v_2

t — ?

Розв'язок

Проаналізувавши умову, побачимо, що це задача на рівномірний рух одного тіла відносно іншого, причому кожне з них бере участь у складному русі — рухається відносно води й разом з водою відносно берега. Визначимо тіла, що беруть участь у русі: човен, буксир і катер мають швидкості відносно води й переносну разом з нею.

У запропонованій задачі систему відліку зручно пов'язати з буксиром, тому що всі події, які відбуваються, розглядаються відносно нього. У системі відліку, пов'язаною з буксиром, буксир перебуває у стані спокою, човен віддаляється від нього із швидкістю v_2 , а катер від буксира — із швидкістю $v_1 + v_2$, а разом із човном наближається до нього зі швидкістю $v_1 - v_2$.

Припустимо, що за час t_1 , через який катер наздожене човен, буксир віддаляється від човна на відстань s_1 , тоді рівняння руху для катера й човна за цей час має вигляд: $s_0 + s_1 = (v_1 + v_2)t_1$ і $s_1 = v_2 t_1$. Якщо для повернення на буксир катеру треба було час t_2 , то рівняння його руху має вигляд: $s_0 + s_1 = (v_1 - v_2)t_2$. Шуканий час руху катера буде дорівнювати: $t_1 + t_2$. За цей час катер проходить відстань $s = 2(s_0 + s_1)$.

Отже, отримано п'ять рівнянь, що містять п'ять невідомих величин (s_0, s_1, t_1, t_2, t), з яких потрібно визначити тривалість руху катера t і пройдений шлях s . Розв'язуючи рівняння, знаходимо $t = 2s_0/(v_1 - v_2)$; $s = 2s_0(1 + v_2/v_1)$.

Якщо вибрати систему відліку, що рухається разом з водою або пов'язану із Землею, розв'язання задачі буде складнішим.

Задача 3. Визначити доцентрове прискорення точок земної поверхні на екваторі, на широті 45° і на полюсі, викликане добовим обертанням Землі.

Дано:

$$T = 24 \text{ год} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$\varphi_1 = 0 \text{ рад}$$

$$\varphi_2 = 45^\circ \approx 0,79 \text{ рад}$$

$$\varphi_3 \approx 1,57 \text{ рад}$$

$$a_{\varphi_1}, a_{\varphi_2}, a_{\varphi_3} \text{ — ?}$$

Розв'язок

Усі точки земної поверхні беруть участь в добовому обертанні Землі з кутовою швидкістю

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1); \text{ отже, мають доцентрове прискорення}$$

$a_\varphi = \omega^2 r \quad (2)$, де $r = R \cos \varphi$ — радіус кола, по якому рухається точка, φ — широта місця, R — радіус Землі (див. малюнок).

$$\text{Із рівностей (1) і (2) одержимо } a_\varphi = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos \varphi,$$

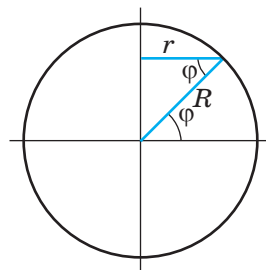
звідки прискорення точок на екваторі, на широті 45° і на полюсі відповідно дорівнюють:

$$a_{\varphi_1} = \frac{4\pi^2}{T^2} R = \frac{43,14^2}{8,64^2 \cdot 10^8} \approx 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2 \quad (\cos \varphi_1 = 1);$$

$$a_{\varphi_2} = a_{\varphi_1} \cos \varphi_2 \approx 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,7 \text{ м/с}^2 \approx 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2;$$

$$a_{\varphi_3} = 0, \text{ тому що } \cos \varphi_3 = \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

$$\text{Відповідь: } a_{\varphi_1} = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2, a_{\varphi_2} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2, a_{\varphi_3} = 0.$$



Мал. 2

Задача 4. Автомобіль розпочинає рух із стану спокою й долає перший кілометр із прискоренням a_1 , а другий — a_2 . На першому кілометрі його швидкість зростає на 10 м/с , а на другому — 5 м/с . Визначте прискорення автомобіля на кожній ділянці шляху.

Дано:

$$s_1 = s_2 = 10^3 \text{ м}$$

$$v_0 = 0$$

$$v_1 = 10 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 15 \text{ м/с}$$

$$a_1 \text{ — ?};$$

$$a_2 \text{ — ?}$$

Розв'язок

Нехай вісь OX збігається з напрямком руху автомобіля. Початок осі виберемо в точці, з якої автомобіль розпочинає рух. Запишемо рівняння руху автомобіля й формулу швидкості:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}; \quad v = v_0 + at.$$

У кінцевій точці першої ділянки шляху рівняння набувають вигляду:

$$s_1 = x_1 - x_0 = \frac{a_1 t_1^2}{2}; \quad v_1 = a_1 t_1. \text{ Розв'язуючи ці рівняння, одержуємо } v_1^2 = 2a_1 s_1,$$

$$\text{звідки } a_1 = \frac{v_1^2}{2s_1}; \quad a_1 = \frac{10^2}{2 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ (м/с}^2\text{)}. \text{ Для кінцевої точки другої ділянки рівняння набувають такого вигляду:}$$

$$s_2 = x_2 - x_0 = v_1 t_2 + \frac{a_2 t_2^2}{2}; \quad v_2 = v_1 + a_2 t_2 \quad (\text{тому що } v_{02} = v_1);$$

$$s_2 = x_2 - x_0 = v_1 t_2 + \frac{a_2 t_2^2}{2}; \quad v_2 = v_1 + a_2 t_2.$$

Розв'язуючи одержані рівняння, знаходимо:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a_2 S_2, \quad a_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2S_2}; \quad a_2 = \frac{15^2 - 10^2}{2 \cdot 10^3} = 6,25 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right).$$

Задача 5. Рух автомобіля по шосе описується рівнянням $x = 3t - 4t^2$. Побудувати графік залежності швидкості і прискорення від часу.

Дано:

$$x = 3t - 4t^2.$$

$$v = f(t) \quad \text{— ?}$$

$$a = f(t) \quad \text{— ?}$$

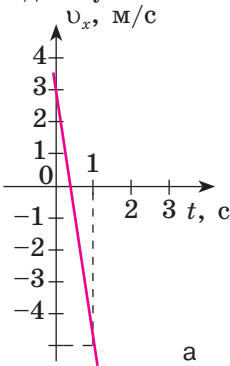
Розв'язок

Рівняння рівнозмінного прямолінійного руху має ви-

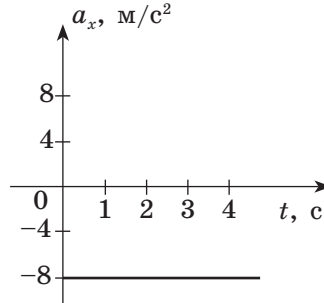
$$\text{гляд } x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Порівнявши рівняння (1) з рівнянням руху автомобіля, можна зрозуміти, що $x_0 = 0$, $v_{0x} = 3 \text{ м/с}$, $\frac{a_x}{2} = -4 \text{ м/с}^2$, $a_x = -8 \text{ м/с}^2$. Маючи ці дані, можна знайти вираз для швидкості руху автомобіля і згідно з ним побудувати графік залежності $v = f(t)$: $v = 3 - 8t$. Оскільки залежність швидкості від часу лінійна, то для побудови графіка достатньо знайти значення швидкості руху автомобіля для двох довільних моментів часу: $t_1 = 0 \text{ с}$, $v_1 = 3 \text{ м/с}$; $t_2 = 1 \text{ с}$, $v_2 = -5 \text{ м/с}$, що показано на мал. а.

Оскільки рух рівносповільнений ($a_x < 0$), то графік залежності прискорення від часу матиме вигляд, показаний на мал. б.



а



б

Задачі для самостійного розв'язання

- 1 (с). Із двох пунктів А і В, розташованих на відстані 90 м один від одного, одночасно в одному напрямку почали рухатися два тіла. Тіло, що рухається із пункту А, має швидкість 5 м/с, а із пункту В — 2 м/с. Через який час перше тіло наздожене друге? Яке переміщення здійснить кожне тіло? Завдання розв'язати аналітично й графічно.
- 2 (с). За графіком переміщення (мал. 1) побудувати графік швидкості й визначити характер руху тіла відносно осі ОХ.

3 (с). Один автомобіль, рухаючись рівномірно із швидкістю 12 м/с протягом 10 с, здійснив таке ж переміщення, що й інший, за 15 с. Яка швидкість другого автомобіля?

4 (с). Турист вийшов з пункту, розташованого в 2 км до сходу й в 1 км до півночі від перехрестя доріг, і за 1 год пройшов 5 км до сходу під кутом 135° . Визначте кінцеве положення туриста.

2 (с). Користуючись прямокутною системою координат, зобразити вектор переміщення, спрямований під кутом 45° на північний схід від точки, розташованої в 1 км до сходу й у 2 км до півночі від розвилки доріг. Знайдіть координати кінця вектора переміщення, якщо його модуль дорівнює 25 км.

6 (с). Тіло перемістилося з точки з координатами $x_0 = 1$ м і $y_0 = 4$ м у точку з координатами $x_1 = 5$ м і $y_1 = 1$ м. Знайдіть модуль вектора переміщення тіла і його проекції на осі координат.

7 (с). Визначте за графіком характер руху тіла (мал. 2).

8 (с). За графіком переміщення (мал. 3) накресліть графік швидкості.

9 (д). Першу половину шляху автомобіль рухається із швидкістю 80 км/год, а другу — 40 км/ч. Знайдіть середню швидкість руху автомобіля.

10 (д). Потяг протягом 10 с збільшив швидкість із 36 до 54 км/год. Протягом наступних 0,3 хв він рухався рівномірно. Визначте переміщення й середню швидкість потяга. Побудуйте графіки швидкості й переміщення.

11 (д). Швидкість тіла виражається формулою $v = 2,5 + 0,2t$. Знайдіть переміщення тіла через 20 с після початку руху.

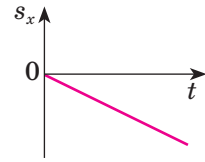
12 (д). Потяг, що рухається горизонтальною ділянкою шляху із швидкістю 36 км/год, прискорюється і долає 600 м, збільшуючи швидкість до 45 км/год. Визначте прискорення й час прискореного руху.

13 (д). В одному напрямку з однієї точки одночасно рухаються два тіла: одне рівномірно із швидкістю 98 м/с, друге — рівноприскорено без початкової швидкості з прискоренням 980 см/с^2 . Через який час друге тіло наздожене перше?

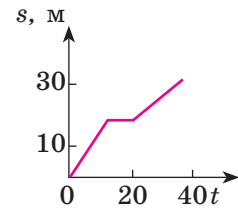
14 (д). За другу секунду руху автомобіль долає 1,2 м. З яким прискоренням він рухається? Визначте його переміщення за десятю секунду руху.

15 (д). Рівняння руху тіла має такий вигляд: . Визначте прискорення й початкову швидкість тіла.

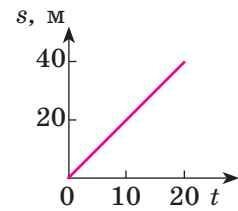
16 (д). Потяг відійшов від станції із прискоренням 20 см/с^2 . Набувши швидкості 37 км/год, він рухається рівномірно протягом 2 хв, потім, загальмувавши, долає ще 100 м до зупинки. Знайдіть середню швидкість потяга. Побудуйте графік швидкості.



Мал. 1.

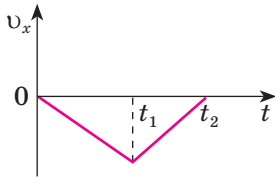


Мал. 2.

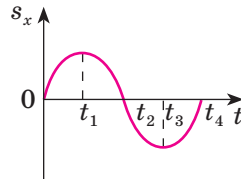


Мал. 3.

- 17 Першу половину часу автомобіль рухається із швидкістю 80 км/год, а другу — 40 км/год. Визначте середню швидкість автомобіля.
- 18 (д). Тіло рухається прямолінійно. На відстані 1 км від початкового положення воно зупиняється, а потім у протилежному напрямку долає 1,2 км до повної зупинки. Яке переміщення й пройдений шлях здійснило тіло?
- 19 (д). Автомобіль, рухаючись рівноприскорено, долає суміжні ділянки шляху довжиною 100 м кожна за 5 і 3,5 с. Визначте прискорення й середню швидкість руху автомобіля на кожній з них і на обох ділянках разом.
- 20 (д). Пасажира потяга, що рухається із швидкістю 40 км/год, спостерігає протягом 3 с зустрічний потяг довжиною 75 м. З якою швидкістю рухається зустрічний потяг?
- 21 (в). За графіком швидкості (мал. 4) побудуйте графіки переміщення й прискорення та обґрунтуйте характер руху тіла на різних ділянках.

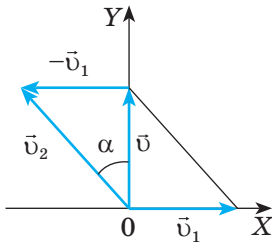


Мал. 4

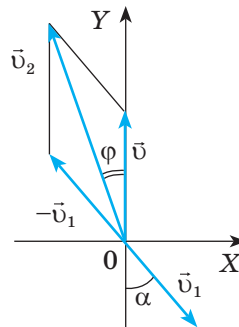


Мал. 5

- 22 (в). За графіком переміщення (мал. 5) побудувати графік швидкості й прискорення та обґрунтуйте характер руху на кожній ділянці.
- 23 (в). Човен перетинає річку, рухаючись перпендикулярно до берега із швидкістю 2 м/с. Під яким кутом до вибраного напрямку осі OY і з якою швидкістю відносно поверхні води весляр тримає курс, якщо швидкість течії становить 5 км/год (мал. 6)?



Мал. 6



Мал. 7

- 24 (в). З якою швидкістю і яким курсом повинен рухатися літак, щоб за 2 год пролетіти на північ 300 км, якщо під час польоту дме північно-західний вітер під кутом до меридіана із швидкістю 27 км/год (мал. 7)?
- 25 (в). Літак летить відносно повітря із швидкістю 800 км/год. Вітер дме із заходу на схід зі швидкістю 15 м/с. З якою швидкістю буде рухатися літак відносно землі на південь і під яким кутом до меридіана треба тримати курс?

- 26 (в).** Моторний човен долає ту саму відстань за течією річки за 4 год, а проти неї — за 6 год. За який час човен проплив би цю відстань у стоячій воді?
- 27 (в).** Визначте середню орбітальну швидкість супутника, якщо середня висота його орбіти над Землею становить 1200 км, а період обертання — 105 хв.
- 28 (в).** Які кутова і лінійна швидкості точок поверхні Землі на широті 45° ?
- 29 (в).** Турбіна ГЕС має діаметр робочого колеса 9 м і здійснює 68,2 обертів за хвилину. Визначте швидкість кінців лопатів турбіни.

ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

Шановні друзі! Опрацьовуючи розділ «Механіка», ви поглиблюєте свої знання про механічний рух, його види та характеристики, особливості взаємодії тіл, фундаментальні фізичні закони та їх застосування для вивчення механічних явищ.

Незважаючи на те, що механіка — один із найдавніших розділів фізики, вона відкриває багато напрямів для подальшого вивчення — від створення новітніх матеріалів із заданими механічними властивостями до сучасних приладів для вивчення механічного руху, аналізу та обробки результатів його досліджень.

Пропонуємо вам долучитися до актуальних досліджень механічних явищ і розпочати роботу над навчальним проектом. Цей важливий вид навчальної діяльності не є новим для вас — над проектами ви вже працювали, вивчаючи фізику в 7, 8 та 9-му класі.

У 10-му класі ви вже маєте достатньо ґрунтовні знання з основ природничих наук (фізики, біології, хімії, географії) для того, щоб робота над навчальним проектом була справжнім творчим процесом, сповненим ваших особистих відкриттів у пізнанні природи.

Працюючи над проектом, зверніть увагу на те, що всі природничі науки досліджують фундаментальні закони природи — закони збереження та розв'язують найактуальніші для людства проблеми — пошук екологічно чистих джерел енергії, створення здоров'язберезувальних технологій, відновлення природи. Тому найбільш результативними будуть проекти, в яких вам вдасться комплексно використати знання та вміння, набуті під час вивчення цих природничих предметів.

Хоча ви тільки розпочали вивчення курсу фізики й астрономії і попереду ще багато нового та цікавого, пропонуємо вже зараз спільно з учителем поміркувати над вибором теми проекту, щоб уже до закінчення вивчення першого розділу опрацювати його. А можливо, цю роботу ви продовжите й під час вивчення наступних розділів і виконаєте комплексний проект.

Коротко охарактеризуємо основні види та етапи навчальних проектів, над якими ви вже можете розпочати роботу. Інформаційні проекти спрямовані на пошук інформації про певний об'єкт або явище, її аналіз і узагальнення фактів. Практичні проекти передбачають розв'язання практичних завдань та створення різноманітних моделей, макетів, приладів, розроблення рекомендацій щодо їх використання. Дослідницькі проекти — це міні-наукові дослідження, що мають чітку та добре обмірковану структуру. Під час роботи над ними увага приділяється аргументації актуальності теми дослідження, визначенню його методології, предмета та завдань дослідження, формулюванню гіпотез, вибору шляхів розв'язання проблем дослідження. Кожен навчальний проект має кілька основних етапів:

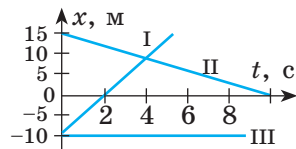
- організаційно-підготовчий (мотивація, формування мікрогруп, визначення мети та завдань проекту, розроблення плану);
 - пошуковий (збирання, аналіз і систематизація інформації, її обговорення в мікрогрупах, висунення й перевірка гіпотези, практична частина проекту, оформлення макета або моделі проекту, оцінка проміжних результатів);
 - підсумковий (оформлення проекту, підготовка презентації, аналіз виконаної роботи, оцінювання внеску кожного з виконавців);
 - презентація результатів (подання отриманих результатів та їх захист, відповіді на запитання, оцінювання результатів роботи, усвідомлення отриманих результатів і способів їх отримання). Тему навчального проекту ви можете обрати з наведених далі або запропонувати власну, погодивши її з учителем.
- Як приклад пропонуємо вам такі навчальні проекти у розділі «Механіка»:
- інформаційні: видатні вітчизняні та закордонні вчені-фізики та астрономи; фізика та астрономія в житті й творчості відомих письменників і поетів; розвиток наукових досліджень з механіки в Україні та вашому місті;
 - практичні: запис механічних рухів; визначення коефіцієнта тертя; механічні властивості різних матеріалів та їх застосування;
 - дослідницькі: визначення напруженості гравітаційного поля для певної точки земної поверхні; як спрогнозувати дальність та висоту стрибків тощо. Бажаємо успіхів!

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№1)

- 1 (п).** Автоматична міжпланетна станція здійснює переліт Земля — Марс. Коли можна вважати її матеріальною точкою:
- А** Під час оцінювання ризику зіткнення з метеоритом.
Б Під час обчислення часу перельоту.
В Під час визначення розмірів станції в атмосфері Марса.
Г Під час посадки на Марс.
- 2 (п).** Два автомобілі рухаються в одному напрямку по прямому шосе з однаковими швидкостями. Чому дорівнює швидкість першого автомобіля відносно другого?

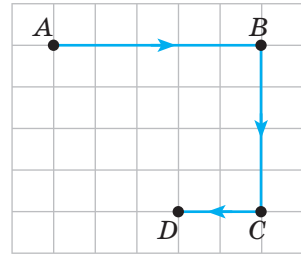
А	Б	В	Г
0	\vec{v}	$2\vec{v}$	$-\vec{v}$

- 3 (с).** Тіло рухається рівноприскорено вздовж осі OX . Установіть відповідність «фізична величина — графік залежності фізичної величини від часу».
- | | |
|--|--|
| 1 Проекція переміщення тіла s_x . | А Пряма, паралельна осі Ot . |
| 2 Модуль прискорення руху. | Б Парабола, що обов'язково проходить через початок координат. |
| 3 Координата x тіла. | В Гіпербола, що не перетинає вісь Ot . |
| 4 Проекція швидкості руху v_x тіла. | Г Парабола, що може й не проходити через початок координат. |
| | Д Пряма під певним кутом до осі Ot |
- 4 (с).** На малюнку наведено графіки руху трьох тіл, що рухаються вздовж осі OX . Виберіть правильне твердження.
- А** Швидкість руху першого тіла збільшується.
Б Швидкість руху другого тіла зменшується.
В Третє тіло перебуває у спокої.
Г Перше тіло рухається зі швидкістю 2,5 м/с.



- 5 (с).** На малюнку наведено траєкторію $ABCD$ руху матеріальної точки. Визначте, у скільки разів шлях точки перевищує модуль її переміщення.

А	Б	В	Г
1,6	1,8	2,0	2,2



- 6 (с).** Із міст A і B , відстань між якими становить 150 км, одночасно виїхали назустріч один одному прямою дорогою два автомобілі із швидкостями 60 і 40 км/год відповідно. Виберіть правильне твердження.

А Перший автомобіль рухається відносно другого зі швидкістю 100 км/год.

Б Відстань між автомобілями зменшується на 100 км за кожну годину.

В Автомобілі зустрінуться через 150 хв.

Г Через 3 год після початку руху відстань між автомобілями дорівнюватиме половині початкової.

- 7 (с).** Турист виїхав із міста прямою дорогою на велосипеді зі швидкістю 25 км/год. У дорозі велосипед зламався, і далі турист пішов пішки із швидкістю 5 км/год. Виберіть правильне твердження.

А Якщо рух на кожній ділянці шляху потребує однакового часу, то середня швидкість туриста дорівнює середньому арифметичному значенню швидкостей на різних ділянках.

Б Якщо турист їхав і йшов однаковий час, то середня швидкість його руху менша, ніж тоді, коли він проїхав і пройшов однакову відстань.

В Якщо турист першу половину часу їхав, а другу — йшов, то середня швидкість руху на всьому шляху дорівнює 20 км/год.

Г Якщо турист половину шляху їхав і половину йшов, то середня швидкість руху на всьому шляху дорівнює 15 км/год.

- 8 (с).** Тіло рухається рівноприскорено вздовж осі OX . У початковий момент воно перебуває в початку координат, проекція початкової швидкості руху, а проекція прискорення. Виберіть правильне твердження.

А Швидкість руху тіла за кожну секунду збільшується на 2 м/с.

Б Через 4 с після початку руху швидкість тіла дорівнюватиме за модулем початковій швидкості.

В Протягом перших чотирьох секунд тіло рухатиметься в додатному напрямку осі OX .

Г Шлях, пройдений тілом за перші чотири секунди руху, дорівнює нулю.

- 9 (с).** Колонна автобусів завдовжки 450 м їде по шосе зі швидкістю 20 м/с. Колону обганяє мотоцикл, який рухається із швидкістю 126 км/год. Укажіть правильне твердження. Поясніть, чому інші твердження є неправильними.

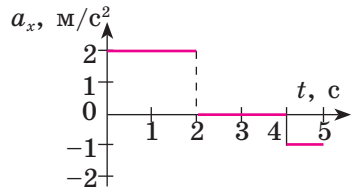
А Швидкість руху мотоцикла відносно колони становить 55 м/с.

Б Мотоцикл не зможе обігнати колону, оскільки швидкість його руху менша від швидкості руху колони.

В Мотоцикл обгонить колону за 30 с.

Г Шлях, який під час обгону подолає мотоцикл, дорівнюватиме 450 м.

10 (с). На малюнку наведено графік проєкції прискорення тіла, що рухається вздовж осі OX ($v_0 = 0$). Виберіть правильне твердження.



А Протягом перших двох секунд тіло рухається рівномірно.

Б Після другої впродовж 2 с тіло рухається з постійною швидкістю.

В Протягом п'ятої секунди тіло рухається з постійною швидкістю.

Г Протягом перших двох секунд тіло перебуває в стані спокою.

11 (д). Матеріальна точка рухається по колу радіусом 3 м. Укажіть правильне твердження. Поясніть, чому інші твердження є неправильними.

А Траєкторія руху матеріальної точки є прямолінійною.

Б Шлях, який пододала точка за $1/2$ оберту, дорівнює $1/5\pi$ м.

В Переміщення матеріальної точки за $1/6$ оберту дорівнює 3 м.

Г За будь-який інтервал часу шлях, який долає матеріальна точка, дорівнює її переміщенню.

12 (д). Швидкість руху диска «болгарки» в точці дотику з поверхнею, яку обробляють, дорівнює 80 м/с. Діаметр диска 160 мм. Укажіть правильне твердження. Поясніть, чому інші твердження є неправильними.

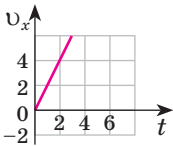
А Обертота частота диска 25 об/с.

Б Кутова швидкість обертання диска 500 рад/с.

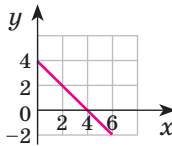
В Доцентрове прискорення точки на краю диска 40 м/с².

Г Період обертання диска 4π с.

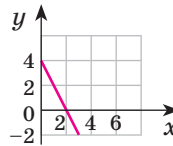
13 (д). Тіло (матеріальна точка) рухається в площині XOY . Цей рух задано рівняннями: $x = 2t$, $y = 4 - 2t$. На якому малюнку подано графік траєкторії руху цього тіла?



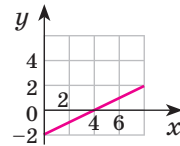
А



Б



В



Г

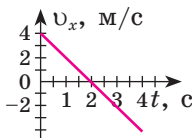
14 (в). Установіть відповідність між видами руху і графіками кінематичних величин, зображеному на малюнках.

А Рівномірний рух.

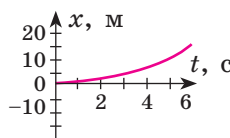
Б Рівноприскорений рух ($a_x > 0$).

В Рівноприскорений рух ($a_x < 0$).

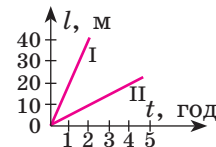
Г Вільне падіння.



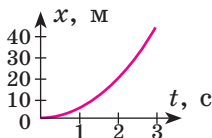
А



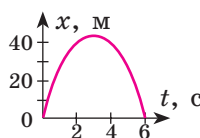
Б



В



Г



Д

- 15 (д).** За 4 с тіло пройшло шлях 80 см, причому його швидкість збільшилася в 3 рази. Вважаючи рух рівноприскореним із початковою швидкістю, визначте прискорення тіла.
- 16 (д).** Пасажир потяга помітив, що дві зустрічні електрички промчали повз нього з інтервалом часу $t_1 = 6$ хв. З яким інтервалом часу t_2 проїхали ці електрички повз станцію, якщо потяг, у якому перебуває пасажир, їхав із швидкістю $v_1 = 100$ км/год, а швидкість кожної з електричок $v_2 = 60$ км/год?
- 17 (в).** З автобусної станції вирушають рейсові автобуси маршрутів A , B і C , що рухаються по одному шосе. Автобуси першого маршруту виходять із станції в середньому через 10 хв, другого — 8 хв, третього — 5 хв. На якій відстані в середньому рухається один автобус від іншого на шосе, якщо їх швидкість дорівнює 30 км/год?
- 18 (в).** Вершник проїхав 5 км за перші 40 хв. Наступну година він рухався зі швидкістю 10 км/год, а останні 6 км шляху — із швидкістю 12 км/год. Визначте середню швидкість вершника за весь час руху, за першу годину й на першій половині шляху.
- 19 (в).** З пункту A виїхав автомобіль із постійною швидкістю. Через час t з того ж пункту в тому напрямку розпочинає рухатися інший і наганяє перший у пункті B , що перебуває на відстані s_1 від A . Побудуйте графіки руху автомобілів і за графіком визначте швидкість другого автомобіля. Розв'яжіть задачу аналітично.
- 20 (в).** Першу половину шляху машина рухалася зі швидкістю 40 км/год. Потім стали рухатися під кутом 180° (30°) до свого початкового напрямку руху із швидкістю 60 км/год. Які середня швидкість руху й середня швидкість переміщення машини.
- 21 (в).** Швидкісний ліфт у висотному будинку піднімається рівномірно із швидкістю 3 м/с. Накресліть графік переміщення. Визначте за графіком час, за який ліфт сягає висоти 90 м (26-й поверх).

§ 9. Перший закон Ньютона

- ▶ Основне завдання динаміки
- ▶ Перший закон Ньютона
- ▶ Інерціальні системи відліку

ОСНОВНЕ ЗАВДАННЯ ДИНАМІКИ. Із розвитком наукового знання природничі уявлення розширювалися. Уважне спостереження за простими рухами в земних умовах (рух каменю, кинутого під кутом до горизонту, падіння тіл з певної висоти, скочування кульки по нахиленому жолобі тощо) дало ключ до розуміння причин руху. На основі цих спостережень було вибудовано теорію механічного руху, основу якої утворили закони динаміки.

Динаміка — розділ механіки, який вивчає закони механічного руху тіл та причини, що викликають цей рух або його зміну.

Слово «динаміка» походить від грецького $\delta\upsilon\upsilon\alpha\mu\iota\zeta$ (*dynamis*) — сила. Отже, поняття сили, що є кількісною мірою взаємодії, буде важливим у цьому розділі.

Основним завданням динаміки є встановлення зв'язків між кінематичними характеристиками руху і причинами, що його зумовлюють.

Основу динаміки утворюють три закони, які традиційно називають законами Ньютона. Вони вперше викладені у знаменитій книзі цього вченого, яка була опублікована в 1686 році і мала назву «Математичні засади натуральної філософії».

ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. І. Ньютон у книзі «Математичні засади натуральної філософії» подає закон інерції Галілея як перший закон динаміки (перший закон Ньютона):

Будь-яке тіло перебуватиме у стані спокою або рухатиметься прямолінійно і рівномірно доти, доки вплив інших тіл не змінять цього стану.

У механіці рух тіла, яке не зазнає впливу інших тіл (або полів), називають вільним рухом. Отже, згідно із законом інерції, вільний рух відбувається зі сталою швидкістю і триває вічно.

Продовження руху після припинення дії інших тіл, які його спонукали, називають рухом за інерцією.

Практичним врахуванням явища інерції є паски безпеки автомобіля (мал. 9.1). Вони спрацьовують під час різкого гальмування і попереджають травмування водія і пасажирів, які продовжують рух за інерцією з тією самою швидкістю, тоді як автомобіль зупиняється. Пасок безпеки сконструйований так, що при плавному русі його вільний кінець відовжується на потрібну відстань. При різкому рухові під час гальмування спрацьовує спеціальний фіксатор, який не дає паску рухатися й утримує пасажира в сидінні автомобіля.



Мал. 9.1. Використання пасків безпеки

Не важливо, чи водій ти, чи пасажир, використовувати паски безпеки в авто — твій обов'язок, оскільки паски безпеки є ефективним засобом безпеки дорожнього руху для запобігання смертності й травматизму. Діти до 12 років повинні обов'язково сидіти в дитячому кріслі або бустері, відповідно до їхньої ваги та віку.

ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ. Але чи в усіх системах відліку виконується закон інерції? Виявляється, ні, лише в інерціальних системах відліку.

Системи відліку, в яких тіло, яке не взаємодіє з іншими тілами, зберігає спокій або рухається прямолінійно та рівномірно, називаються інерціальними.

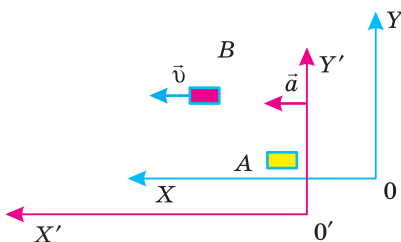
Поняття інерціальної системи відліку є науковою абстракцією, оскільки не існує абсолютно нерухомих тіл, з якими можна було б її пов'язати. Проте досвід показує, що для рухів більшості тіл, які оточують людину, інерціальною системою відліку з достатнім наближенням буде система, пов'язана з Землею. Так, ваш будинок є нерухомим у системі відліку, пов'язаній із Землею, тому наближено його можна вважати інерціальною системою відліку. Інерціальними системами з більшою точністю будуть системи, пов'язані з Сонцем та зорями. Вони з давніх-давен використовуються в мореплавстві.

Будь-який рух (як і стан спокою) є відносним, тому для його опису потрібно обрати систему відліку. Отже, стверджуючи, що тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху, варто зазначити систему відліку, відносно якої розглядається цей рух.

Будь-яка система відліку, яка перебуває в стані спокою відносно інерційної системи або рухається відносно неї прямолінійно рівномірно, також є інерціальною.

Тому можна говорити про те, що інерціальних систем відліку може існувати як завгодно багато, проте в кожній з них тіла взаємодіють за одними й тими самими законами динаміки.

Розглянемо інерціальну систему XOY , в якій тіло A перебуває в стані спокою, а тіло B рухається прямолінійно й рівномірно зі швидкістю $\vec{v} = \text{const}$ (мал. 9.2). Виберемо іншу систему відліку $X'O'Y'$, яка рухається відносно першої з прискоренням $\vec{a} = \text{const}$. Тоді відносно системи відліку $X'O'Y'$ і тіло A , і тіло B рухаються прискорено, хоч на них і не діють інші тіла (тобто відсутні сили, що зумовлюють їхнє прискорення). Таким чином, у системі відліку, що рухається з прискоренням, закон інерції не виконується.



Мал. 9.2.

Отже, еквівалентність станів спокою та прямолінійного рівномірного рухів можлива лише в інерціальних системах, які перебувають у стані спокою, або рухаються прямолінійно й рівномірно одна відносно одної.

Прикладом неінерціальних систем, які рухаються з прискоренням відносно інерціальної системи Земля, є системи відліку, пов'язані з потягом, автобусом або автомобілем, що рушають з місця чи гальмують. Предмети та пасажирів в них змінюють свою швидкість без видимої взаємодії з іншими тілами (Землею, потягом чи автомобілем). Під час різкого гальмування швидкість пасажирів відносно Землі зберігається сталою. Але відносно системи відліку, пов'язаної із салоном автобуса, який різко змінює свою швидкість, пасажирів рухаються прискорено, що може викликати їх падіння (мал. 9.3).



Мал. 9.3. Неінерціальна система відліку, пов'язана з салоном автобуса

! Головне в цьому параграфі

Закон інерції: якщо на тіло не діють інші тіла, то воно рухається прямолінійно та рівномірно, тобто зберігає свою швидкість сталою.

Будь-яка система відліку, яка перебуває в стані спокою відносно інерціальної системи або рухається відносно неї прямолінійно рівномірно, теж є інерціальною

Продовження руху після припинення дії інших тіл, які його спонукали, називають рухом за інерцією.

? Запитання для самоперевірки

1. Які повсякденні спостереження дають підстави вважати, що будь-який рух тіла зумовлений його взаємодією з іншими тілами, а які не підтверджують цього?
2. Чи всім тілам властива здатність зберігати початковий характер руху?
3. У чому полягає закон інерції і чи завжди він виконується?
4. У яких системах відліку механічні явища є еквівалентними (повністю однаковими)?
5. Чим відрізняються характеристики руху за Арістотелем та Галілеєм?
6. Скільки можна встановити інерціальних систем відліку і як саме? Наведіть приклади.

Вправа до § 9

- 1 (п.) Яким чином можна підтвердити закон інерції?
 - а) одноразовим його застосуванням до конкретного тіла;
 - б) математичними виведенням та логічним міркуванням;
 - в) багаторазовим використанням для розв'язування практичних задач механіки.
- 2 (п.) Потяг рушає з місця і набирає швидкість. Чи можна з будь-яким вагоном пов'язати інерційну систему відліку?
- 3 (с.) Одним із популярних фокусів є висмикування скатертини зі столу, на якому є посуд. Поясніть, чому наповнені склянки і тарілки залишаються на місці, якщо різко висмикнути скатертину?

- 4 (с.)** Щоб вирвати буряк або моркву із землі, їх потрібно тягнути за гичку повільно. Чому?
- 5 (с.)** Чи можна стверджувати, що коли в певній системі відліку тіла не взаємодіють, то рух відсутній повністю?
- 6 (д.)** Хто рухається швидше один відносно одного: велосипедист, який їде прямолінійно зі швидкістю 20 км/год, чи його товариш, котрий їде у протилежному напрямі зі швидкістю 5 км/год?
- 7 (д.)** Чому паски безпеки сучасних авто називають інерційними? Поясніть принцип їхньої дії.
- 8 (д.)** З якими з небесних тіл доцільно пов'язувати інерціальні системи відліку: а) Сонце; б) Земля; в) Місяць; г) зоря Арктур. Поясніть.

§ 10. Другий закон Ньютона

- ▶ *Інертність тіл. Маса*
- ▶ *Сила. Додавання сил*
- ▶ *Другий закон Ньютона*

ІНЕРТНІСТЬ ТІЛ. Маса. З досвіду відомо, що тіла не можуть миттєво змінювати свою швидкість. Щоб розігнати до певної швидкості велосипед або автомобіль, а також щоб зупинити їх (зменшити швидкість руху до нуля), потрібен деякий час. З цієї самої причини для літаків будують аеродроми — злітно-посадкові смуги. Властивість тіл зберігати свою швидкість сталою називають інертністю. Різні тіла мають різну інертність. Якщо взаємодіють два тіла, то більш інертним буде те, швидкість якого зазнала меншої зміни.

Мірою інертності тіла є його маса. Це поняття ввів у фізику І. Ньютон, означивши масу як кількість речовини у фізичному тілі. Надалі ми послуговуватимемося трохи модифікованим визначенням.

Маса — це скалярна фізична величина, що обумовлює інертні властивості тіла.

З досвіду відомо, що тіло з більшою масою є більш інертним. Так, вантажний автомобіль важче зрушити з місця, ніж легковий. Але і гальмівний шлях вантажівки значно більший, ніж у легкового за тієї самої швидкості руху.

Масу позначають малою латинською літерою m . Одиницею маси є кілограм (кг). Позасистемною одиницею маси, що використовується нарівні з одиницями СІ є тонна ($1 \text{ т} = 1000 \text{ кг}$)

СИЛА. ДОДАВАННЯ СИЛ. Мірою механічної взаємодії між тілами є фізична величина — сила. З цією фізичною величиною ви вже знайомилися в курсі фізики. І. Ньютон визначив силу як кількість руху, яка передається тілу за одиницю часу. Сила може спричинювати прискорення і деформацію тіла.

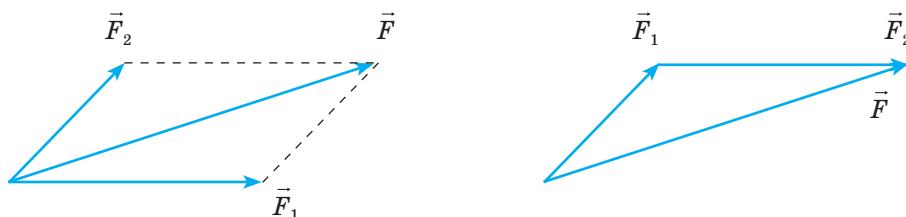
Сила — векторна фізична величина, що є мірою взаємодії між тілами.

Силу позначають літерою \vec{F} . У СІ одиницею сили є Ньютон (Н). Модуль вектора сили позначають або $|\vec{F}|$, або літерою F без стрілочки над нею. Проекцію вектора сили на вісь, наприклад OX , позначають F_x . Довжина вектора \vec{F} у певному масштабі показує числове значення сили.

Якщо на тіло діє кілька сил, їх можна звести до однієї рівнодійної.

Рівнодійна сила — це сила, яка діє так само, як декілька окремих сил, прикладених до тіла.

Рівнодійну силу знаходять як геометричну (векторну) суму всіх сил, прикладених до тіла. Слід пам'ятати, що рівнодійна сила є лише розрахунковою величиною, якою ми можемо замінити дію кількох сил. Окремі сили називають складовими. Визначення рівнодійної кількох складових сил є додаванням сил (мал. 10.1).



Мал. 10.1. Додавання сил за правилами додавання векторів

ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. З курсу фізики 9-го класу вам відома залежність між прискоренням тіла масою m та силою, що надає цього прискорення вказаному тілу

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

Якщо на тіло масою m одночасно діють дві сили \vec{F}_1 та \vec{F}_2 , то воно рухатиметься з прискоренням $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$, яке відповідає рівнодійній силі \vec{F} . Тобто $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{m}$.

Якщо на тіло одночасно діють кілька сил, то прискорення тіла буде пропорційне рівнодійній цих сил, тобто геометричній сумі всіх цих сил: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$

Отже, другий закон Ньютона записують і в такому вигляді:

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

В інерціальній системі відліку прискорення тіла прямо пропорційне геометричній сумі всіх сил, які діють на тіло, і обернено пропорційне масі тіла.

З другого закону Ньютона можна встановити одиницю сили.

1 Н — це сила, під дією якої тіло масою 1 кг набуває прискорення 1 м/с^2 у напрямку дії сили.

Якщо перший закон Ньютона описує інертні властивості тіл і визначає системи відліку, в яких вони виявляються, то другий закон Ньютона є основним законом для розрахунків фізичних величин, що характеризують механічний рух тіл. За допомогою другого закону Ньютона розв'язують основну задачу динаміки: визначають закон руху тіла.

! Головне в цьому параграфі

Маса тіла — це кількісна міра його інертності (фізичної властивості протидіяти зміні швидкості руху тіла).

Сила — векторна фізична величина, що є мірою взаємодії між тілами.

Сила є повністю визначеною, якщо задано її модуль $|\vec{F}|$, точка прикладання, лінія дії та напрям дії, який позначають стрілкою.

Рівнодійну силу знаходять як геометричну (векторну) суму всіх сил, прикладених до тіла, $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$.

Другий закон Ньютона: в інерціальній системі відліку прискорення тіла прямо пропорційне геометричній сумі всіх сил, що діють на тіло, і обернено пропорційне масі тіла.

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають масою тіла?
2. Як пов'язане прискорення тіла з його масою та величиною діючої сили?
3. Розкрийте особливості руху тіла під дією кількох сил. Чи залежить дія сили на тіло від дії інших сил?
4. Запишіть і сформулюйте другий закон Ньютона.
5. Чи в усіх системах відліку виконується другий закон динаміки (другий закон Ньютона)?

Вправа до § 10

- 1 (с). Яка з формул: $a = \frac{F}{m}$; $F = ma$; $m = \frac{F}{a}$ виражає фізичний зміст другого закону Ньютона? Відповідь поясніть.
- 2 (с). З якою силою потрібно подіяти на тіло масою 500 г, щоб надати йому прискорення 2 м/с^2 ?
- 3 (с). Визначте прискорення, з яким тіло масою 1 кг падає на Землю, якщо на нього діє сила тяжіння 9,8 Н.
- 4 (д). Візок рухається по горизонтальній поверхні зі швидкістю 0,5 м/с. Його наздоганяє другий візок, котрий рухається зі швидкістю 1,5 м/с. Після зіткнення обидва візки рухаються у тому ж напрямку зі швидкістю 1 м/с. Знайдіть відношення мас візків.

- 5 (в). Під дією деякої сили візок, рухаючись зі стану спокою, пройшов шлях 40 см. Коли ж на візок поклали вантаж 200 г, то під дією такої ж сили за той самий час візок пройшов зі стану спокою шлях 20 см. Визначить масу візка.

§ 11. Третій закон Ньютона

- ▶ Третій закон Ньютона
- ▶ Межі застосування третього закону Ньютона

ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. Виходячи з результатів подібних дослідів, був сформульований третій закон Ньютона.

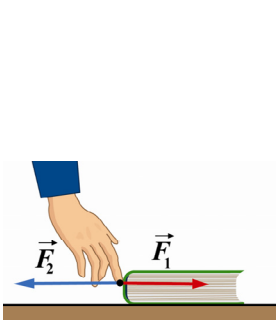
Ньютон третій закон сформулював так: для дії завжди є рівна і протилежна протидія, тобто взаємні дії двох тіл одне на одне рині між собою і напрямлені протилежно.

Сучасне формулювання третього закону Ньютона:

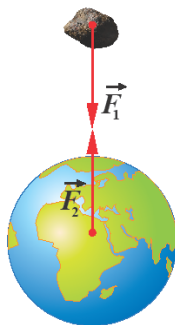
Сили, з якими два тіла діють одне на інше, однакові за модулем та протилежні за напрямом.

За третім законом Ньютона, тіла, що беруть участь у взаємодії, діють одне на одного з однаковими силами, які мають протилежний напрям. Натиснемо рукою на книжку із силою \vec{F}_1 , книжка буде протидіяти нам із силою \vec{F}_2 , причому $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ (мал. 11.1—11.5).

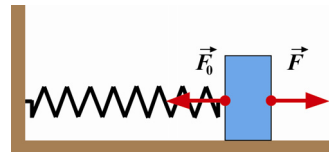
Значення третього закону Ньютона полягає передусім у тому, що він відображає важливу властивість, спільну для будь-яких взаємодій: дія



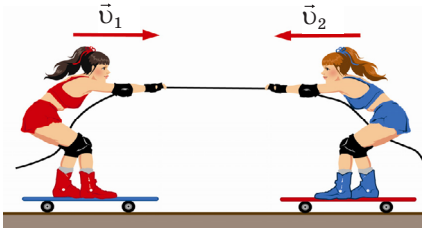
Мал. 11.1.
За третім законом Ньютона $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$



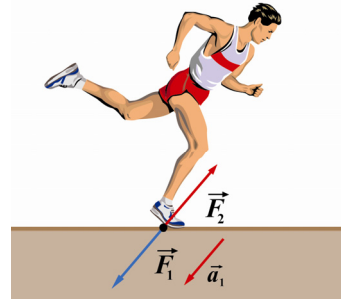
Мал. 11.2. Сила, з якою Земля притягує камінь, чисельно дорівнює та протилежна силі, з якою камінь притягує Землю.



Мал. 11.3. Щоб дві сили зрівноважилися, вони мають бути однакові за модулем, протилежні за напрямом і мають прикладатися до одного тіла



Мал. 11.4. Взаємодія двох скейбордисток



Мал. 11.5. Взаємодія легкоатлета із Землею

завжди викликає рівну їй протидію. Важливо, що ці сили прикладені до різних тіл, а тому не можуть урівноважувати одна одну.

МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ ТРЕТЬОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА. Як і другий, так і третій закон Ньютона виконується тільки в інерціальних системах відліку, визначених першим законом Ньютона. Щоб застосовувати другий та третій закони Ньютона, потрібно обрати систему відліку, в якій на тіла, взаємодія яких розглядається, не впливають інші тіла (немає зовнішніх впливів) або зовнішні впливи скомпенсовані, замкнені системи.

Тому, розглядаючи ту чи іншу взаємодію і застосовуючи до неї третій закон Ньютона, потрібно враховувати особливості системи, до складу якої входить тіло.

! Головне в цьому параграфі

Третій закон Ньютона: сили, з якими два тіла діють одне на інше, однакові за модулем та протилежні за напрямом, тобто дія завжди викликає рівну їй протидію.

Третій закон Ньютона виконується тільки в інерційних системах відліку, визначених першим законом Ньютона. Щоб застосовувати другий та третій закони Ньютона, потрібно обрати систему відліку, в якій на тіла, що взаємодіють, не впливають інші тіла (немає зовнішніх впливів), або зовнішні впливи скомпенсовані.

Застосовуючи третій закон Ньютона, потрібно враховувати, що, згідно з цим законом, сили дії та протидії прикладені до різних тіл, а тому не можуть взаємно компенсуватися.

? Запитання для самоперевірки

1. Сформулюйте третій закон Ньютона.
2. Чи компенсують одна одну сили, котрі виникають під час взаємодії двох тіл?
3. Чому під час зіткнення вантажівки та легкового автомобіля у легкового авто завжди більші ушкодження, ніж у вантажівки?

ПРАКТИКУМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ № 2

Динаміка вивчає механічний рух тіл з урахуванням причин, що обумовлюють характер певного руху. Механічний рух тіл змінюється в результаті їх взаємодії. Щоб успішно розв'язати задачу з динаміки, необхідно дотримуватися такого алгоритму:

1. Чітко усвідомити, з якими тілами взаємодіє тіло, що розглядається, показати всі сили, які характеризують взаємодію, позначити їхній напрям і точку прикладання. Результуюча всіх сил, що діють на тіло, надає йому прискорення, якщо вона не дорівнює нулю. (Слід пам'ятати, що сили взаємодії, прикладені до різних тіл, не можуть додаватися).

2. Далі слід обрати тіло відліку і пов'язану з ним систему координат. Напрямок координатних осей обирають залежно від умов конкретної задачі.

Якщо розглядається задача, в якій всі сили діють на тіло вздовж однієї прямої, то прискорення так само буде спрямоване вздовж цієї прямої. У такому разі береться лише одна координатна вісь, спрямована в напрямі руху тіла.

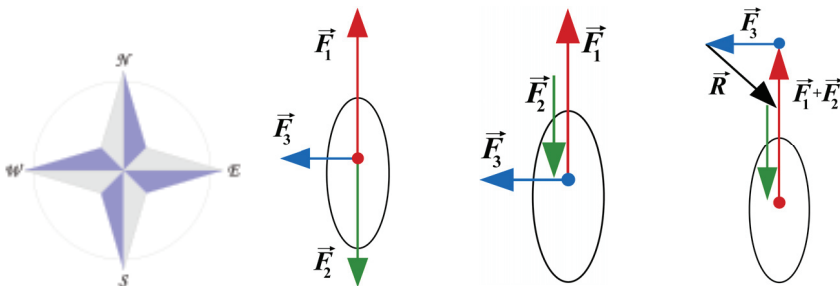
Якщо сили діють на тіло під кутом до напрямку його руху, слід їх розкласти на складові, спрямовані по лінії руху тіла і перпендикулярно до неї.

3. Далі треба всі сили, які розглядаються, спроектувати на координатні вісі й записати рівняння другого закону Ньютона, що пов'язує проекції сил і прискорень. У результаті записаний у векторній формі другий закон Ньютона перетворюється у два скалярні рівняння для складових прискорень і сил за напрямками координатних вісей. Відповідно, якщо обрана одна координатна вісь, то і рівняння буде одне: $ma_x = \sum F_x$.

Слід пам'ятати: якщо в певному напрямі тіло не рухається або рухається рівномірно, його прискорення в цьому напрямі дорівнює нулю, а тому і сума проекцій сил на цю вісь дорівнює нулю.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Моторний човен масою 500 кг рухався на північ під дією сили тяги двигуна $F_1 = 2$ кН та сили опору води $F_2 = 0,5$ кН. Визначити прискорення і напрям руху човна, якщо на встановлене на човні вітрило почав дяти східний вітер із силою $F_3 = 1$ кН.



Малюнок до задачі 1.

Дано:
 $m = 500 \text{ кг}$
 $F_1 = 2 \text{ кН}$
 $F_2 = 0,5 \text{ кН}$
 $F_3 = 1 \text{ кН}$
 $a = ?$

Розв'язок

Проаналізуємо умову задачі та зробимо малюнок. Моторний човен із вітрилом рухається під дією трьох сил: сили тяги \vec{F}_1 , сили опору води \vec{F}_2 та сили вітру \vec{F}_3 . Нехай сила тяги напрямлена на північ.

Сила опору води напрямлена протилежно напрямку руху човна — на південь. Вітер східний, отже, сила вітру напрямлена зі сходу на захід. За другим законом Ньютона $m\vec{a} = \vec{F}$, де \vec{F} — результуюча сила: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$.

Сили \vec{F}_1 та \vec{F}_2 напрямлені вздовж однієї прямої, але в протилежних напрямках, і їх результуючу легко визначити: $\vec{F}'_{1,2} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ за правилом додавання векторів.

Наступним кроком є визначення результуючої дії сил $\vec{F}'_{1,2}$ та \vec{F}_3 : $\vec{R} = \vec{F}'_{1,2} + \vec{F}_3$. За правилом паралелограма знаходимо напрям результуючої сили, що діє на човен. Човен рухається на північний захід.

Визначимо модуль та напрям результуючої сили. Спочатку знайдемо значення F' .

$$F_{1,2} = F_1 - F_2 = 2 \text{ кН} - 0,5 \text{ кН} = 1,5 \text{ кН}.$$

$$R = \sqrt{F_{1,2}^2 + F_3^2}; R = \sqrt{1,5^2 + 1} = 1,8 \text{ кН}.$$

Визначимо прискорення човна $a = \frac{R}{m}$; $a = \frac{1,8 \text{ кН}}{500 \text{ кг}} = \frac{1800 \text{ Н}}{500 \text{ кг}} = 3,6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Відповідь: човен рухається на північний захід із прискоренням $3,6 \text{ м/с}^2$.

Задача 2. Вантаж масою 50 кг піднято вертикально вгору за допомогою каната на висоту 10 м за 2 с . Визначити силу натягу каната, якщо рух був рівноприскореним. Якою буде сила натягу каната за рівноприскореного спуску.

Дано:
 $m = 50 \text{ кг}$
 $h = 10 \text{ м}$
 $t = 2 \text{ с}$
 $T = ?$

Розв'язок

На вантаж діє сила натягу та сила тяжіння mg . За другим законом Ньютона:
 $\vec{F} + \vec{T} = m\vec{a}$.

Спрямуємо вісь OY вертикально вгору. Тоді рівняння руху в проекціях на цю вісь запишеться так:

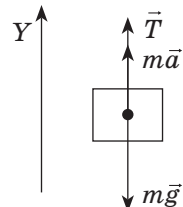
$$T_y - mg = ma_y; \text{ але } T = T_y; a = a_y.$$

Оскільки рівноприскорений рух почався із стану спокою,

$$h = \frac{at^2}{2}; a = \frac{2h}{t^2}; T = m \left(\frac{2h}{t^2} + g \right);$$

$$T = 50 [(20/4) + 9,8] = 740 \text{ (Н)}.$$

Очевидно, що під час рівноприскореного підняття вантажу сила натягу каната більша за силу тяжіння вантажу.



Мал. До задачі 2.

Розглянемо інший випадок. Під час його рівноприскореного спуску в проєкціях на координатну вісь рівняння руху матиме вигляд:

$$T - mg = -ma; T = m(g - a); T = 50(9,8 - 5) = 240 \text{ (Н)}.$$

Відповідь: сила натягу каната, під час рівноприскореного підйому 740 Н, а під час рівноприскореного спуску 240 Н.

Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (п).** За багато років до Ньютона італійський художник і вчений Леонардо да Вінчі висловив таке твердження: «Якщо сила за заданий час переміщує тіло на певну відстань, то та ж сила половину такого тіла перемістить на таку ж відстань за удвічі менший час». Чи правильне це твердження?
- 2 (с).** Дві людини тягнуть мотузку в протилежні боки із силою 50 Н кожен. Чи розірветься мотузка, якщо вона витримує натяг до 80 Н?
- 3 (с).** Відомий парадокс «коня і воза» полягає в такому. Кінь тягне віз із деякою силою. Відповідно до третього закону Ньютона віз діє на коня з рівною, але протилежно напрямленою силою. Здавалося б, віз і кінь повинні при цьому рухатися у протилежні сторони. Чому ж коню вдається везти віз за собою?
- 4 (с).** Як пояснити, що бігун, який спіткнувся, падає в напрямку свого руху, а посковзнувшись на льоду спортсмен падає в напрямку, протилежному напрямку свого руху?
- 5 (с).** Куля масою 9 г за $2,0 \cdot 10^{-4}$ с пробиває дерев'яну дошку. При цьому її швидкість зменшується з 800 м/с до 300 м/с. Знайдіть силу опору, яку чинить дошка.
- 6 (д).** Тіло масою 0,5 кг починає рухатися зі стану спокою під дією сили 35 Н. Визначте швидкість тіла через 4 секунди від початку руху.
- 7 (д).** Після удару футболіста нерухомий м'яч масою 500 г набуває швидкості 10 м/с. Визначте силу удару, якщо він тривав 0,5 с.
- 8 (д).** Під дією сили в 20 Н матеріальна точка рухається з прискоренням $0,4 \text{ м/с}^2$. З яким прискоренням рухатиметься точка під дією сили в 50 Н?
- 9 (д).** На тіло масою 2160 кг, що лежить на горизонтальній дорозі, діє сила, під дією якої тіло за 30 с проходить відстань 500 м. Знайдіть величину цієї сили.
- 10 (д).** Візок рухається по горизонтальній поверхні зі швидкістю 30 см/с і стикається з нерухомим візком такої ж маси. В результаті візок, який рухався, зупинився. Визначте швидкість руху другого візка після зіткнення.
- 11 (в).** До пристані причалюють два однакові човни. Човнярі підтягуються до берега за допомогою мотузок. Протилежний кінець першої мотузки прив'язаний до стовпа на пристані; за протилежний кінець другої мотузки тягне матрос, що стоїть на пристані. Всі троє докладають однакових зусиль. Який човен причалить раніше?
- 12 (в).** Порожньому причепу автівка надає прискорення $0,4 \text{ м/с}^2$, а навантаженому $0,1 \text{ м/с}^2$. Якого прискорення надасть автівка обом причепам, з'єднаним разом? Силу тяги автівки вважати незмінною.

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№2)

- 1 (п).** Якщо векторна сума всіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю, то:
А напрям руху тіла змінюється.
Б швидкість тіла залишається незмінною.
В швидкість тіл з часом зростає.
Г швидкість тіла з часом спадає.

- 2 (п).** Як виражається одиниця сили 1 Н через основні одиниці СІ?

А
 $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$

Б
 $\frac{\text{Г} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$

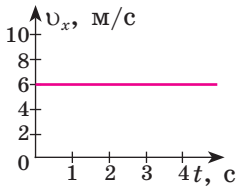
В
 $\frac{\text{кг} \cdot \text{км}}{\text{год}^2}$

Г
 $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$

- 3 (п).** Установіть відповідність «фізична величина — позначення фізичної величини».

- | | |
|----------------|--------------|
| 1 Прискорення. | А a |
| 2 Маса. | Б F |
| 3 Сила. | В t |
| 4 Швидкість. | Г x |
| | Д v |

- 4 (с).** На малюнку зображено графік залежності проекції швидкості трамваю масою 20 т, що рухається прямолінійно. Знайдіть модуль рівнодійної всіх сил, що діють на трамвай.



- А** 0 Н
Б 20 МН
В 12 кН
Г 120 Н

- 5 (с).** При взаємодії двох тіл відношення модулів їхніх прискорень $\frac{a_2}{a_1} = 2$.

Чому дорівнює маса першого тіла, якщо маса другого 10 кг.

- А** 20 кг
Б 5 кг
В 0,2 кг
Г 12 кг
- 6 (с).** Тіло дією масою 1 т під дією сили 5 кН буде рухатися:
А Рівномірно зі швидкістю 100 км/год
Б Рівноприскорено з прискоренням 5 м/с²
В Рівномірно зі швидкістю 5 м/с
Г Рівноприскорено з прискоренням 0,2 м/с²
- 7 (д)** Визначте гальмівну силу, що діє на автомобіль масою 2 т, якщо рівняння руху має вигляд: $x = 20t - 5t^2$.
- 8 (д)** Автобус масою 20 т почав рух зі стану спокою під дією сили тяги двигуна 100 кН. Запишіть рівняння руху автобуса, якщо рух почався з точки з координатою 20 м. Сила опору рухові автобуса — 1000 Н.
- 9 (д)** На одну й ту саму точку тіла діють дві сили під прямим кутом одна до одної. Значення однієї сили 3 Н. Якою є друга сила, якщо їх рівнодійна 5 Н?
- 10 (в)** Тіло масою 2 кг падає з висоти 5 м і занурюється в сніг на 50 см. Знайдіть силу опору снігу, якщо сила опору повітря 4 Н.

§ 12. Закон всесвітнього тяжіння

- ▶ Закон всесвітнього тяжіння
- ▶ Сила тяжіння
- ▶ Космічні швидкості. Штучні супутники

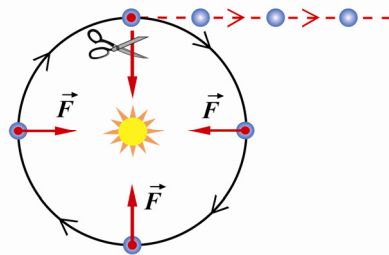
ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ. Ви вже знаєте, що всі тіла поблизу поверхні Землі падають з однаковим прискоренням — прискоренням вільного падіння. Це означає, що сила тяжіння, яка діє на тіло з боку Землі, пропорційна масі цього тіла. Зрозуміло, що сили, з якими взаємодіють два тіла, мають однакову фізичну природу. Тому, якщо сила притягання двох тіл пропорційна масі одного тіла, то вона пропорційна і масі другого тіла. А це й означає, що сила притягання двох тіл пропорційна добутку їхніх мас.

Виявляється, що маса є мірою не тільки інертних властивостей тіла, а й мірою гравітаційної взаємодії між тілами. Хоча інертна та гравітаційна маса є концептуально різними поняттями, проте всі відомі на сьогодні експерименти свідчать, що ці маси приблизно рівні між собою.

У системі відліку, пов'язаній із Сонцем, планети рухаються приблизно зі сталою за модулем швидкістю по орбітах, близьких до колових¹. Отже, вони рухаються з прискоренням, спрямованим до Сонця. А це означає, що на планети з боку Сонця діє сила притягання. Якби це притягання до Сонця зникло, планети відлетіли б від Сонця, рухаючись по інерції, тобто прямолінійно й рівномірно (мал. 12.1). І Місяць не міг би бути супутником Землі, якби між Землею і Місяцем не було притягання.

Ми знаємо, що планети, зокрема Земля, обертаються навколо Сонця. Сонце притягує планети. Земля притягує Місяць, утримуючи його на орбіті. Від чого залежить сила взаємного притягання між небесними тілами? Чи тільки небесні тіла можуть взаємодіяти? Чи можна це перевірити, якщо врахувати величезні відстані між небесними тілами: Землі від Сонця (150 000 000 км), Землі від Місяця (384 000 км). Якою має бути сила, щоб утримати на орбіті таку велику планету як Земля? На ці запитання ми шукатимемо відповіді.

До XVII ст. вчені вважали, що тільки Земля має особливу властивість притягувати до себе всі тіла, які перебувають поблизу її поверхні. У 1667 р. Ньютон висловив дивне для тих часів твердження, що між усіма тілами діють сили взаємного притягання.



Мал. 12.1.

Якби притягання до Сонця зникло, планети відлетіли, від Сонця, рухаючись по інерції

¹ Точніше, траєкторії планет є еліпсами. Еліпс – це крива, що нагадує витягнуте (або стиснене) коло.

Два тіла, які можна розглядати як матеріальні точки, притягуються одне до одного із силою, прямо пропорційною добутку їхніх мас та обернено пропорційною до квадрата відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

де m_1 та m_2 — маси тіл, що взаємодіють; r — відстань між ними; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравітаційна стала.

Гравітаційна стала дорівнює силі гравітаційного притягання двох тіл масою по 1 кг кожне, що перебувають на відстані 1 м одне від одного.

Гравітаційна стала, можливо, найскладніше вимірюється з усіх фізичних сталей. Вперше гравітаційну сталю виміряв Генрі Кавендіш за допомогою сконструйованих ним крутильних терезів. Відтоді точність вимірювань зросла лише незначно.

СИЛА ТЯЖІННЯ. Виходячи із закону всесвітнього тяжіння, всі тіла притягуються одне до одного гравітаційними силами. Сила тяжіння — гравітаційна сила, що діє на тіло з боку Землі. Від чого ж залежить прискорення вільного падіння?

На тіло масою m , що перебуває на висоті h над поверхнею Землі, діє гравітаційна сила (мал. 12.2) притягання F_g , яка дорівнює:

$$F_g = G \frac{mM_3}{r^2} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де M_3 — маса Землі, R_3 — радіус Землі.

Прискорення a_g , якого набуває тіло під дією гравітаційної сили, можна знайти з другого закону Ньютона, це є прискорення вільного падіння тіла на висоті h .

$$a_g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

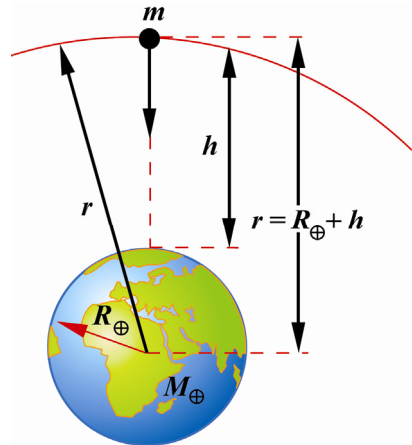
Поблизу поверхні Землі ($h \ll R_3$)

$$F_g = G \frac{m \cdot M_3}{R_3^2}, \text{ звідки}$$

$$a_g = \frac{F_g}{m} = G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

$$a_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{5,972 \cdot 10^{24}}{(6,371 \cdot 10^6)^2} = 9,8 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)$$

Ця величина вам вже відома з курсу фізики $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.



Мал. 12.2. Гравітаційна сила в полі тяжіння Землі

Прискорення вільного падіння (гравітаційне прискорення) — це прискорення якого набуває тіло під дією гравітаційної сили поблизу поверхні небесних тіл (планет, зірок).

Прискорення вільного падіння дещо змінюється залежно від географічної широти місця на поверхні Землі. Так, на екваторі $g = 9,78 \text{ м/с}^2$, на полюсах Землі $g = 9,83 \text{ м/с}^2$. Ця різниця значень зумовлена обертанням Землі навколо своєї осі. Для Києва вимірювання дають таке значення прискорення вільного падіння: $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$. Для розв'язування багатьох задач можна вважати, що прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$, або й 10 м/с^2 .

Сила тяжіння, що діє на тіло масою m поблизу поверхні Землі дорівнює

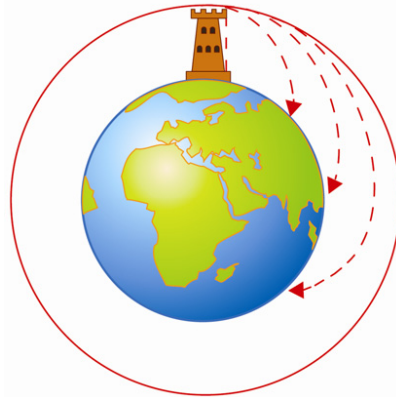
$$\vec{F}_g = m\vec{g}.$$

У табл. 12.1 наведено гравітаційне прискорення на певних небесних тілах Сонячної системи, значення якого залежить від їхньої маси та радіуса.

Таблиця 12.1.

Гравітаційне прискорення

Небесні тіла	Гравітаційне прискорення, м/с^2
Меркурій	3,7
Венера	8,9
Земля	9,8
Місяць	1,6
Марс	3,7
Юпітер	26
Сатурн	12
Уран	11
Нептун	12
Плутон	2



Мал. 12.3. Схема запуску штучного супутника Землі, запропонована І. Ньютоном

КОСМІЧНІ ШВИДКОСТІ. ШТУЧНІ СУПУТНИКИ. Ви вже знаєте, що тіло, кинуте горизонтально з деякою швидкістю \vec{v}_0 , пролетить у горизонтальному напрямі відстань $s = v_0 t$ і впаде на Землю. Що станеться, якщо швидкість кидання збільшувати? З формули $s = v_0 t$ видно, що чим більша швидкість кидання, тим далі від підніжжя вежі впаде тіло (мал. 12.3).

Швидкість, яку необхідно надати тілу, щоб воно рухалося по коловій орбіті поблизу поверхні Землі, називається першою космічною швидкістю.

Для обчислення першої космічної швидкості варто розуміти, що гравітаційна сила, виходячи з другого закону Ньютона: $F = ma$, де a — доцентрове прискорення. Отже справедливим буде рівняння

$$ma = G \frac{m \cdot M}{r^2},$$

де m — маса тіла; M — маса планети; G — гравітаційна стала; r — радіус орбіти, що приблизно дорівнює радіусу планети R_3 .

$$m \frac{v^2}{R_3} = G \frac{m \cdot M}{R_3^2}$$

Звідси перша космічна швидкість: $v = \sqrt{G \frac{M}{R_3}}$.

Для Землі $M_3 = 5,97 \cdot 10^{24}$ кг, $R_3 = 6\,378\,000$ м, отримаємо, що перша космічна швидкість — 7,9 км/с.

Першу космічну швидкість можна визначити через прискорення вільного падіння. Оскільки $g = G \frac{M_3}{R_3^2}$ то $v = \sqrt{gR_3}$.

Якщо супутник масою m рухається на висоті h над поверхнею Землі, то можна вважати, що прискорення супутника дорівнює:

$$a_h = \frac{v_h^2}{(R_3 + h)}.$$

Це прискорення супутнику надає сила тяжіння Землі: $F = G \frac{m \cdot M_3}{(R_3 + h)^2}$.

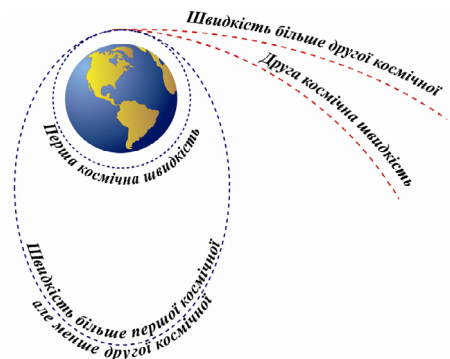
За другим законом Ньютона: $a_h = \frac{F}{m}$. Отже, справедливим є рівняння

$$\frac{v_h^2}{(R_3 + h)} = G \frac{m \cdot M_3}{m(R_3 + h)^2}, \text{ звідки } v_h^2 = \frac{GM_3}{R_3 + h} \text{ або } v_h = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}}.$$

Наприклад, перша космічна швидкість супутника, який обертається по коловій орбіті на висоті 300 км над поверхнею Землі, буде:

$$v_{300} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{637 \cdot 10^4 \text{ м} + 30 \cdot 10^4 \text{ м}} \approx 7,73 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Якщо надати тілу швидкості, більшої за першу космічну, то воно рухатиметься не по колу, а по еліпсу — так називається замкнута крива, що нагадує «видовжене» коло (мал. 12.4). Зі зростанням початкової швидкості розміри еліпса зростати-



Мал. 12.4. Траєкторія космічного апарата залежно від його швидкості

муть, а при початковій швидкості 11,2 км/с тіло назавжди покине навколоземний простір. Швидкість 11,2 км/с називають другою космічною швидкістю.

При цьому тіло, відлетівши від Землі, все-таки залишається супутником Сонця. Така само доля чекає на космічні кораблі, які вирушають для дослідження інших планет Сонячної системи — Марса і Венери.

! Головне в цьому параграфі

Закон всесвітнього тяжіння: два тіла, які можна розглядати як матеріальні точки, притягуються одне до одного із силою, прямо пропорційною добутку їхніх мас та обернено пропорційною до квадрата відстані між ними: $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, де m_1 та m_2 — маси взаємодіючих тіл; r — від-

стань між ними; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравітаційна стала.

Гравітаційна стала дорівнює силі гравітаційного притягання двох тіл масою по 1 кг кожне, що перебувають на відстані 1 м одне від одного.

Маса одночасно виступає і як міра інертних властивостей тіл, і як міра гравітації.

Швидкість, яку необхідно надати тілу, щоб воно рухалося по коловій орбіті поблизу поверхні Землі, називається першою космічною швидкістю. Вона становить 7,9 км/с.

Швидкість 11,2 км/с називають другою космічною швидкістю; набувши, її тіло назавжди покине навколоземний простір.

? Запитання для самоперевірки

1. Як рухалися б планети, якби їх не притягувало Сонце?
2. Як формулюється закон всесвітнього тяжіння? Хто його відкрив?
3. У яких випадках можна застосовувати формулу: $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$?
4. У скільки разів сила гравітаційного притягання двох куль масою по 1 кг, що перебувають на відстані 1 м одна від одної, менша за сили їх притягання до Землі?
5. У чому полягає фізичний зміст гравітаційної сталої?
6. Чому не наближаються один до одного предмети в кімнаті, незважаючи на їхнє гравітаційне притягання?
7. Які властивості тіл характеризує маса?

§ 13. Гравітаційне поле та вага тіла

- ▶ *Гравітаційне поле*
- ▶ *Вага тіла*

ГРАВІТАЦІЙНЕ ПОЛЕ. Складності в розумінні дії тіл на відстані були подолані за допомогою поняття силового поля, яке було розвинуто в XIX ст. англійським ученим Майклом Фарадеєм (1791—1867) для пояснення явищ електромагнетизму. У XIX ст. вчені дійшли висновку, що взаємодія електричних зарядів «на відстані» здійснюється за допомогою електричного поля — особливого стану матерії в просторі навколо заряджених тіл. Уявлення про взаємодію тіл через відповідне поле було названо концепцією близькодії. У XX ст. поняття поля було поширене на всі види взаємодій, в тому числі й на гравітаційну.

Навколо кожного тіла існує його своєрідне матеріальне продовження — гравітаційне поле (поле тяжіння).

Гравітаційне поле навколо тіла неоднакове: воно сильніше поблизу тіла і поступово слабшає в міру віддалення від нього. Тому, чим далі від нас будь-яке тіло, тим слабкіше його притягання. Гравітаційне поле залежить від маси тіла, що створило його: чим більша маса тіла, тим сильніше його поле, і, навпаки, чим менша маса тіла, тим слабше його поле.

ВАГА ТІЛА. Поряд із силою тяжіння в побуті та техніці використовують поняття «вага тіла».

Вагою тіла називають силу, з якою тіло, притягуючись до Землі, діє на опору або підвіс.

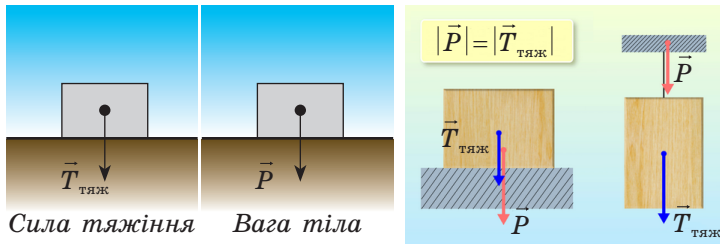
Важливо усвідомити, що сила тяжіння і вага — це дві різні сили, що прикладені до різних тіл і можуть відрізнитися за модулем. Істотні відмінності полягають у такому. По-перше, ці сили прикладені до різних тіл: сила тяжіння прикладена до тіла, а вага тіла — до опори або підвісу. По-друге, ці сили мають різну фізичну природу: сила тяжіння — це прояв сил всесвітнього тяжіння, що діють на відстані, а вага — зазвичай сила пружності, що діє при безпосередньому контакті. І, нарешті, сила тяжіння діє на тіло, що перебуває поблизу Землі, завжди, а вага тіла може при цьому дорівнювати нулю вага — це сила, прикладена не до тіла, а до опори чи підвісу, а сила тяжіння прикладена до тіла (мал. 13.1).

Вага тіла не завжди дорівнює його силі тяжіння. Це спостерігається під час руху тіла з прискоренням.

Якщо опора чи підвіс рухаються з вертикальним прискоренням \vec{a} , то вага тіла не дорівнює силі тяжіння:

$$P = m(g \pm a),$$

знак «+» чи «-» перед прискоренням a залежить від напрямку вертикального прискорення та напрямку руху тіла.



Мал. 13.1. Сила тяжіння і вага, прикладені до різних тіл

Вага тіла, яке перебуває у спокої або рухається рівномірно і прямолінійно, дорівнює силі тяжіння.

Збільшення ваги тіла, викликане рухом по вертикалі вгору, називають перевантаженням: вага тіла більша за гравітаційну силу.

Стан тіла, за тіло рухається тільки під дією сили тяжіння, називається невагомістю.

Причина невагомості полягає в тому, що коли діє тільки сила тяжіння, вона надає тілу і його опорі однакові прискорення, а отже, зникає деформація тіл, викликана їх взаємодією з опорою. Тому будь-яке тіло, яке рухається під дією тільки сили всесвітнього тяжіння, перебуває у стані невагомості.

У стані невагомості перебувають, наприклад, космонавти та предмети, які їх оточують під час орбітальних польотів космічних кораблів. Спостерігаючи за ними за допомогою телебачення, можна бачити, як у кораблі «плавають» випущені космонавтами предмети.

Рух тіла лише під впливом земного тяжіння називають вільним падінням.

! Головне в цьому параграфі

Навколо кожного тіла існує його своєрідне матеріальне продовження — гравітаційне поле (поле тяжіння). Гравітаційне поле навколо тіла неоднакове: воно сильніше поблизу тіла і поступово слабшає в міру віддалення від нього.

Коли опора чи підвіс нерухомі або коли вони рухаються рівномірно й прямолінійно відносно Землі, вага тіла дорівнює силі тяжіння.

Збільшення ваги тіла, викликане рухом по вертикалі догори, називають перевантаженням: вага тіла більша за гравітаційну силу.

Стан тіла, за якого відсутня його взаємодія з опорою (підвісом), коли воно рухається тільки під дією сили тяжіння, називається невагомістю.

? Запитання для самоперевірки

1. Що відрізняє гравітаційне поле від електричного і магнітного?
2. Де гравітаційне поле сильніше — поблизу тіла чи подалі від нього?
3. Яку силу називають вагою?
4. Де розміщені точки прикладання сили тяжіння і ваги тіла?
5. Що таке перевантаження?
6. За яких умов тіло перебуває у стані невагомісті? У чому виявляється невагомість тіла?
7. Як зміниться вага космонавта під час старту ракети та під час її приземлення?
8. Результатом яких незалежних видів рухів є рух тіла, кинутого горизонтально з деякої висоти?

Вправа до § 13

- 1(п). Людина стоїть у ліфті. Визначте й порівняйте сили, які діють на неї у таких випадках: а) ліфт не рухається; б) починає рухатись угору; в) рухається рівномірно; г) сповільнює рух до зупинки.
- 2(с). Визначте вагу нерухомих тіл масами 200 мг; 4 т; 800 г.
- 3(с). Визначте масу тіла, вага якого 20 мкН; 7 кН; 17 МН.
- 4(с). Людина масою 70 кг перебуває в ліфті, який рухається вертикально вгору з прискоренням 1 м/с^2 . Визначте силу тиску (вагу) людини на підлогу кабінки ліфта.
- 5(д). Кабіна ліфту в стані спокою важить 2000 Н. Знайдіть напрям руху, масу та прискорення, з яким починає рухатися кабіна, якщо її вага зменшилась до 1700 Н.
- 6(в). Автобус масою 10 т рухається зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту радіусом кривизни 100 м. Яка його вага у верхній точці траєкторії?

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №3

Для розв'язування задач на рух у вертикальному напрямі координатну вісь зручно направляти по вертикалі догори або донизу, а тілом відліку вважати Землю або точку з якої кинули тіло. Вектор \vec{g} завжди напрямлений вертикально вниз.

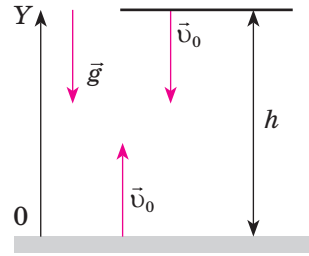
Зверніть увагу! Розглянуті нижче типи задач розв'язуються за допомогою кінематичних формул руху тіл у однорідному полі тяжіння Землі (без урахування опору повітря). Поле тяжіння вважаємо однорідним за умови, що рух відбувається на малих висотах.

Записуючи рівняння залежності фізичних величин від часу через проекції відповідних величин на координатну вісь, необхідно враховувати знак проекції.

Рух тіла, кинутого вертикально вгору до максимальної висоти підйому, є рівносповільненим, донизу — рівноприскореним, без початкової швидкості. Час підйому дорівнює часу падіння (мал. 1).

З певної висоти тіло можуть кидати вниз, надаючи йому деякої початкової швидкості, а можуть відпускати — тоді тіло падає без початкової швидкості ($v_0 = 0$) (вільно падаюче тіло).

Оскільки вільне падіння і рух тіла, кинутого вертикально вгору, є рівноприскореними, то всі кінематичні рівняння такого руху, розглянуті раніше, справедливі й для цих випадків. Запишемо їх до порівняльної таблиці, обравши для запису вісь OY та врахувавши, що прискоренню a відповідає g , а переміщенню s — висоту h . Тож, врахувавши знаки проєкцій, одержимо вирази, наведені в таблиці,



Мал. 1. Рух тіла кинутого вертикально

Таблиця

Кінематичні рівняння

Кінематичне рівняння	Тіло падає з висоти h	Тіло кинуте вертикально вгору
$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$	$v = v_0 + gt$	$v = v_0 - gt$
$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}$	$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$
$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$	Час падіння: $t = \sqrt{\frac{2g}{h}}$, при $v_0 = 0$	Час підйому: $t = \frac{v_0}{g}$
$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x s_x$	Швидкість під час падіння: $v = \sqrt{2gh}$	Висота підйому: $h = \frac{v_0^2}{2g}$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначити глибину колодязя, якщо вільно кинутий у нього камінь досяг поверхні води за 2 с. Яку швидкість матиме цей камінь у момент зіткнення з поверхнею води?

Дано:
 $t = 2$ с
 h — ?
 vt — ?

Розв'язок

Пов'яжемо систему координат із поверхнею Землі, спрямувавши вісь координат OY до дна колодязя.

Відстань h дорівнюватиме: $h = \frac{1}{2}gt^2$, або $h = \frac{1}{2}9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4 \text{ с}^2 = 39,2 \text{ м}$.

Швидкість $v = gt$; $v = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ с} = 19,6 \text{ м/с}$.

Відповідь: 19,6 м/с.

Задача 2. Тіло кинуте вертикально вгору зі швидкістю 20 м/с. Визначити висоту та час його підйому. Опором повітря знехтувати.

Дано:
 $v_0 = 20 \text{ м/с}$

$h = ?$
 $t = ?$

Розв'язок

Пов'яжемо систему координат OY з точкою кидання тіла. Висота підйому тіла вгору дорівнюватиме:

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Кінцева швидкість підйому вгору v дорівнюватиме $v = 0$. Час підйому можна знайти за формулою кінцевої швидкості:

$$v = v_0 - gt, \text{ звідки } v = gt, \text{ а час } t \text{ дорівнює}$$

$$t = \frac{20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \approx 2 \text{ с.}$$

Висота підйому дорівнюватиме:

$$h = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2 \text{ с} - \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4 \text{ с}^2}{2} \approx 40 \text{ м} - 20 \text{ м} = 20 \text{ м.}$$

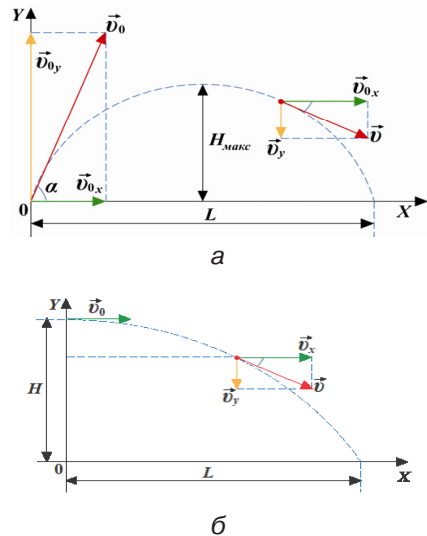
Відповідь: 20 м.

Під дією сили земного тяжіння спостерігають такі рухи: вільне падіння, рух тіла, кинутого вертикально вгору, під кутом до горизонту і горизонтально з певної висоти.

Розглянемо рух тіла, кинутого під кутом α до горизонту з початковою швидкістю \vec{v}_0 і горизонтально зі швидкістю \vec{v}_0 з висоти h над Землею (мал. 2). Такі рухи складаються з двох незалежних один від одного рухів: рівномірного в горизонтальному напрямі (рух за інерцією) і рівноприскореного у вертикальному напрямі (вільне падіння внаслідок притягання до Землі).

Якщо тілу надати початкову швидкість \vec{v}_0 під кутом до горизонту, то його рух буде криволінійним (мал. 2, а).

Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту, є результатом складання двох рухів: рівномірного прямолінійного зі швидкістю $v_{0x} = v_x = \text{const}$ у



Мал. 2. Рух тіла кинутого під кутом до горизонту (а) та горизонтально (б)

горизонтальному напрямі й рівномірного з початковою швидкістю v_{0y} , напрямленою вертикально вгору.

Модуль незмінної горизонтальної складової швидкості: $v_x = v_0 \cos \alpha$.

Модуль вертикальної складової весь час змінюється і визначається за рівнянням: $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$. З цього рівняння можна визначити час t_1 від початку руху тіла до точки максимального підняття, де $v_y = 0$:

$$t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Модуль результуючої швидкості:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0 \sin \alpha - gt)^2}.$$

Вектор результуючої швидкості утворює з горизонтом кут α , що змінюється з часом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

Висота, на яку підніметься тіло за довільний інтервал часу польоту:

$$h = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

Якщо в цей вираз замість t підставити вираз для часу підняття, то матимемо формулу максимальної висоти підняття:

$$H_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Час підняття дорівнює часу падіння з висоти H_{\max} . Повний час польоту по параболі становитиме: $t_{\text{п}} = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

Дальність польоту у горизонтальному напрямі:

$$L = (v_0 \cos \alpha) \cdot t_{\text{п}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Дальність польоту L буде найбільшою за умови, що $\sin \alpha = 1$, тобто коли $\alpha = 45^\circ$. За наявності опору повітря траєкторія польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту, буде не параболою, а балістичною кривою. Дальність польоту при цьому буде меншою від розрахованої за цією формулою.

Рівняння залежності координати тіла від часу для такого руху вздовж осі OX та осі OY :

$$x = x_0 + (v_0 \cos \alpha)t;$$

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

РУХ ТІЛА, КИНУТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО З ВИСОТИ H . Це окремий випадок руху тіла, кинутого під кутом до горизонту ($\alpha = 0$) з деякої висоти H . Це криволінійний рух уздовж гілки параболи під дією земного тяжіння. У вертикальному напрямі вздовж вісі OY відбувається вільне падіння, у горизонтальному напрямі вздовж вісі OX — рівномірний рух (див. мал. 2, б).

У будь-який момент часу швидкість \vec{v} напрямлена по дотичній до траєкторії. Розкладемо вектор \vec{v} на горизонтальну v_x і вертикальну v_y складові. Модуль горизонтальної складової швидкості у будь-який момент часу залишається сталим: $v_x = v_0$, а модуль вертикальної складової лінійно зростає з часом: $v_y = gt$.

Рівняння руху в горизонтальному напрямі: $x = v_x t$, де v_x — проекція швидкості v_0 на вісь OX . Рух тіла у вертикальному напрямі (вздовж осі OY) є вільним падінням, тому рівняння руху по осі OY :

$$y = H - \frac{gt^2}{2}.$$

Оскільки $v_x \perp v_y$, то модуль швидкості \vec{v} у будь-який момент польоту дорівнює: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$.

$$\text{Час падіння до поверхні Землі: } t = \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

$$\text{Дальність польоту: } L = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

$$\text{Модуль швидкості падіння поблизу поверхні Землі: } v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}.$$

Згідно з мал. 2 можна визначити кут α , під яким напрямлено швидкість тіла біля поверхні Землі:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}; \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{v_y}{v_x}.$$

Задача 3. Літак летить горизонтально зі швидкістю 720 км/год на висоті 245 м. Коли він пролітає над деякою точкою поверхні Землі, з нього скидають вантаж. На якій відстані від місця кидання вантаж упаде на Землю? Опір повітря не враховувати.

Дано:

$$v_0 = 720 \text{ км/год} = 200 \text{ м/с}$$

$$H = 245 \text{ м}$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2$$

$$L = ?$$

Розв'язок

Вантаж вільно падає й одночасно рухається за інерцією з горизонтальною початковою швидкістю.

Кінематичні рівняння руху відносно координатних осей мають вигляд: по осі OX рух рівномірний:

$$L = v_0 t;$$

по осі OY — рівносповільнений без початкової швидкості: $y = H - \frac{gt^2}{2}$. У мо-

мент падіння вантажу на землю $y = 0$, тому $H = \frac{gt^2}{2}$. Визначимо час падін-

ня: $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$. Тоді дальність польоту $L = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}}$.

$$\text{Обчислення: } L = 200 \frac{\text{м}}{\text{с}} \sqrt{\frac{2 \cdot 245 \text{ м}}{9,81 \text{ м/с}^2}} = 1414,2 \text{ м} \approx 1,4 \text{ км}$$

Відповідь. $L \approx 1,4$ км.

Розглянемо детальніше рух тіла під дією сили всесвітнього тяжіння.

Задача 4. Середня висота супутника над поверхнею Землі дорівнює 1700 км. Визначити його швидкість та період обертання, якщо радіус Землі дорівнює 6370 км.

Дано:

$$h = 1700 \text{ км} =$$

$$= 1,7 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$R = 6370 \text{ км} =$$

$$= 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$v \text{ — ?}$$

$$T \text{ — ?}$$

Розв'язок

Рух супутника відбувається по коловій орбіті лише

під дією сили всесвітнього тяжіння: $F = G \frac{mM}{(R+h)^2}$,

яка надає йому доцентрове прискорення. Воно обчислюється за формулою: $a = \frac{v^2}{R+h}$;

Виходячи з другого закону Ньютона, можна записати: $F = ma$;

$$G \frac{Mm}{(R+h)^2} = \frac{mv^2}{R+h}.$$

$$\text{Звідки } v^2 = G \frac{M}{R+h}; \quad v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}.$$

У цій формулі G і M — сталі величини, які визначаються за довідником, але можна вчинити так: помноживши чисельник і знаменник

лівого рівняння на R^2 , одержимо: $v^2 = G \frac{M}{R^2} \cdot \frac{R^2}{R+h}$.

У цій формулі вираз $G \frac{M}{R^2}$ означає прискорення вільного падіння біля поверхні Землі, тому можна записати:

$$v^2 = g \frac{R^2}{R+h}; \quad v = \sqrt{\frac{R^2}{R+h} g} = R \sqrt{\frac{g_0}{R+h}}.$$

$$\text{Звідки: } v = 6,37 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{9,8}{6,37 \cdot 10^6 + 1,7 \cdot 10^6}} = 7,1 \cdot 10^3 \text{ (м/с)}.$$

Період обертання супутника по коловій орбіті визначається за формулою:

$$T = \frac{2\pi(R+h)}{v}; \quad T = \frac{6,28(6,37 \cdot 10^6 + 1,7 \cdot 10^6)}{7,1 \cdot 10^3} \approx 7 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

Відповідь: період обертання супутника по коловій орбіті $7 \cdot 10^3$ с.

Ця задача спрощується, якщо розглядається рух супутника на малій висоті h , якою можна знехтувати порівняно з радіусом Землі R . У цьому випадку, якщо вважати $h = 0$, формула для обчислення швидкості набуває вигляду: $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$. За законом всесвітнього тяжіння, $G \frac{Mm}{R^2} = mg$, і $GM = gR^2$. Це дає змогу у формулі швидкості зробити заміну добутку GM і одержати її спрощений вираз:

$$v = \sqrt{gR} \approx 7,9 \text{ км/с}.$$

Одержане рівняння визначає швидкість, яку треба надати тілу, що запускається із Землі, аби воно вийшло на колову орбіту її штучного супутника, тобто першу космічну швидкість.

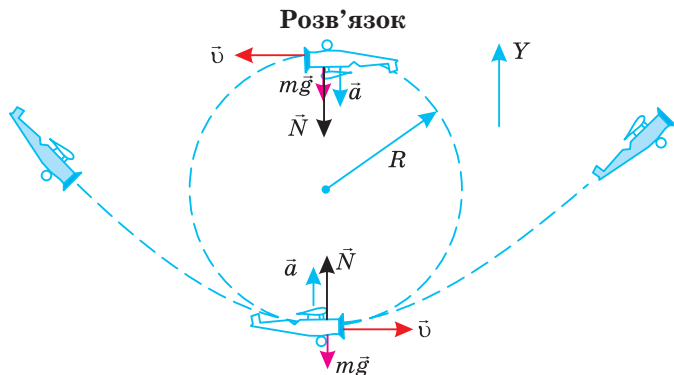
Задача 5. Літак виконує петлю Нестерова («мертву петлю») радіусом $R = 800$ м і рухається по ній зі швидкістю $v = 720$ км/год. З якою вагою пілот масою 70 кг тиснутиме на сидіння літака у верхній і нижній точках петлі?

Дано:

$$\begin{aligned} R &= 800 \text{ м} \\ v &= 720 \text{ км/год} = \\ &= 200 \text{ м/с} \\ m &= 70 \text{ кг} \end{aligned}$$

$P_{\text{н}} = ?$

$P_{\text{в}} = ?$



На пілота, що виконує «мертву петлю», діють сила тяжіння mg та реакції опори N . За другим законом Ньютона:

$$Mg + N = ma, \quad a = \frac{v^2}{R}.$$

Спрямуємо координатну вісь OY догори і спроєктуємо векторне рівняння на цю вісь у верхній точці траєкторії:

$$-N - mg = -m \frac{v^2}{R}; \quad N_{\text{в}} = m \frac{v^2}{R} - mg = m \left(\frac{v^2}{R} - g \right).$$

За третім законом Ньютона:

$$P = -N, \text{ тому } P_B = 70 \text{ кг} \left(\frac{40000 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}}{800 \text{ м}} - 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \right) = 2814 \text{ Н.}$$

У нижній точці «петлі» проекція рівняння руху має вигляд:

$$N_H - mg = m \frac{v^2}{R};$$

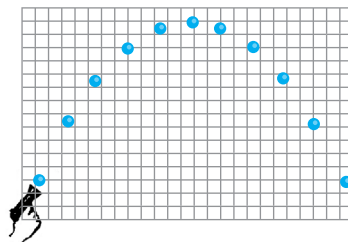
$$N_H = m \left(\frac{v^2}{R} + g \right); \text{ тому } |P_H| = |N| = 70 \text{ кг} \cdot (50 + 9,8) \text{ м/с}^2 = 4186 \text{ Н.}$$

Відповідь: у верхній точці вага пілота 2814 Н, у нижній — 4186 Н.

Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (с). У скільки разів зменшиться сила притягання до Землі космічної ракети при її віддаленні від поверхні Землі на відстань, що дорівнює радіусу Землі?
- 2 (с). З літака, який летить в горизонтальному напрямку зі швидкістю 720 км/год, на висоті 3920 м над землею скинули вантаж. Як далеко від місця викидання вантаж впаде на землю?
- 3 (с). Як зміняться час і дальність польоту тіла, кинутого горизонтально з певної висоти, якщо швидкість кидання збільшити вдвічі?
- 4 (с). Камінь падав на дно ущелини 4 с. Яка глибина ущелини?
- 5 (с). На яку максимальну висоту підніметься тіло, кинуте вгору з початковою швидкістю 44 м/с? Скільки часу триватиме підйом тіла до максимальної висоти?
- 6 (с). М'яч кинули під кутом 30° до горизонту з початковою швидкістю 10 м/с. Визначте висоту підйому та дальність польоту м'яча.
- 7 (д). В якій точці прямої, що з'єднує центри Землі та Місяця, тіло буде притягуватися до Землі і до Місяця з однаковими силами? Вважайте, що середня відстань між центрами Землі та Місяця дорівнює 60 земним радіусам, а маса Місяця у 81 раз менша за масу Землі.
- 8 (д). Визначте прискорення вільного падіння на поверхні Венери, якщо середня густина речовини планети 5200 кг/м^3 , радіус планети 6100 км.
- 9 (д). Місяць обертається навколо Землі зі швидкістю 1 км/с. Середня відстань від Землі до Місяця $3,8 \cdot 10^5 \text{ км}$. Визначте масу Землі.
- 10 (д). Яку швидкість повинен мати штучний супутник Землі, щоб обертатися по коловій орбіті на висоті 600 км над поверхнею Землі? Чому дорівнює період його обертання? Радіус Землі прийняти в 6400 км.
- 11 (д). Автомобіль масою 2 т рухається зі швидкістю 36 км/год. Визначте вагу автомобіля, коли він проходить по випуклому мосту, з радіусом кривизни 40 м.
- 12 (д). Стріла, випущена з лука вертикально вгору, впала на землю через 6 с. Які початкова швидкість стріли і максимальна висота її підйому?
- 13 (д). Тіло, яке вільно падає без початкової швидкості, за останню секунду руху проходить $\frac{2}{3}$ усього шляху. Визначте шлях, пройдений тілом під час падіння.

- 14 (д).** Хлопчик кинув м'яч з вікна горизонтально (з 20-метрової висоти багатоповерхівки). Скільки часу летів м'яч до землі і з якою швидкістю його було кинуте, якщо він упав на відстані 6 м від фундаменту будинку?
- 15 (д).** Дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямі зі швидкістю 10 м/с, дорівнює висоті кидання. З якої висоти кинуте тіло?
- 16 (д).** Хлопчик стрибає у воду з крутого берега заввишки 5 м, маючи після розгону горизонтально напрямлену швидкість 6 м/с. Якими будуть модуль і напрям швидкості хлопчика у той час, коли він досягне води?
- 17 (д).** Снаряд, що вилетів з гармати під кутом до горизонту, перебував у польоті 12 с. Якої найбільшої висоти він досяг?
- 18 (в).** Визначте висоту підняття і дальність польоту сигнальної ракети, випущеної зі швидкістю 40 м/с під кутом 60° до горизонту.
- 19 (в).** На малюнку, зробленому за стробоскопічною фотографією, зображено політ кульки, випущеної з дитячого пружинного пістолета. Знаючи, що сторона квадрата клітинки дорівнює 5 см, визначте:
а) час польоту кульки; б) інтервал між спалахами; в) початкову швидкість кульки.
- 20 (в).** Тіло вільно падає зі стану спокою з висоти 39,2 м. За який час тіло пройде: а) перший метр свого шляху, б) останній метр свого шляху? Чому дорівнює середня швидкість на другій половині шляху?
- 21 (в).** Тіло вільно падає з висоти 80 м. Яке його переміщення за останню секунду падіння?



§ 14. Деформації і сила пружності

- ▶ Деформація
- ▶ Сила пружності
- ▶ Закон Гука

ДЕФОРМАЦІЯ. Як відомо, взаємодія тіл може зумовлювати не тільки зміну їхніх швидкостей, а й зміну їх форми або розмірів.

Зміну форми чи розмірів тіла (або його частин) під дією зовнішніх сил, називають деформацією.

Серед деформацій, які виникають у твердих тілах, можна вирізнити п'ять основних видів: розтягу, стискання, зсуву, кручення і згинання. Ми надалі розглядатимемо деформації розтягу (стискання) (мал. 14.1). Їх ще називають лінійними деформаціями.

Деформації поділяють на пружні, які зникають після припинення дії зовнішніх сил (оскільки молекули тіла повертаються в початкове

положення), і пластичні, коли відновлення форми тіла не відбувається.

Кількісними характеристиками лінійної деформації є абсолютне та відносне видовження.

Абсолютне видовження — фізична величина, що показує зміну розмірів тіла під дією зовнішніх сил.

Абсолютне видовження позначають літерою x або ж Δl , одиницею абсолютного видовження в СІ є метр.

$$\Delta l = l - l_0,$$

де l_0 — початковий розмір недеформованого тіла; l — розмір тіла після деформації. Зрозуміло, що під час розтягу $\Delta l > 0$, під час стискання $\Delta l < 0$.

Відносне видовження — фізична величина, що показує яку частину від початкового розміру l_0 становить абсолютне видовження Δl .

Відносне видовження позначається грецькою літерою «епсILON» (ϵ) й визначається за формулою:

$$|\epsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0} = \frac{|l - l_0|}{l_0}.$$

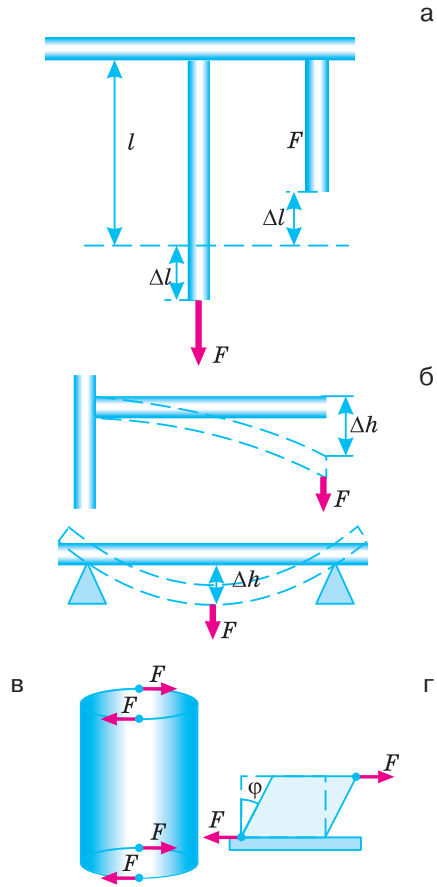
У цьому випадку від-

носне видовження є безрозмірною величиною.

Іноді відносне видовження виражають у відсотках (%), об-

числюючи його за формулою $|\epsilon| = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$.

СИЛА ПРУЖНОСТІ. Ви вже знаєте, що сила є мірою будь-якої взаємодії між тілами незалежно від її фізичної природи. Це означає, що закони динаміки справджуються для будь-якої фундаментальної взаємодії — гравітаційної, слабкої, електромагнітної і сильної. Оскільки слабка і сильна взаємодії є короткодійними (радіус їх дії $10^{-15} - 10^{-17}$ м), то вони не суттєво впливають на макроскопічні або механічні рухи тіл. Гравітаційні й електромагнітні взаємодії є далекодійними, тому впливають на будь-який механічний рух тіл.



Мал. 14.1. Види деформації:

- а — розтягу та стискання;
- б — згину;
- в — кручення;
- г — зсуву

Якщо сили тяжіння діють між тілами завжди і гравітаційну взаємодію не можна припинити, то для прояву, наприклад, сили пружності потрібна спеціальна умова — тіло має бути деформованим.

Сила пружності — сила, що виникає під час деформації тіла і спрямована протилежно до напрямку зміщення частинок тіла під час деформації.

Сила пружності зумовлена електромагнітною взаємодією між зарядженими частинками, з яких складаються тіла. У недеформованому тілі сили притягання та відштовхування між сусідніми частинками компенсуються й вони перебувають у рівновазі. Внаслідок деформації відстань між частинками зменшується або збільшується порівняно з недеформованим станом, що й спричиняє появу сили пружності, яка сприяє відновленню початкових розмірів тіла. Отже, сила пружності завжди напрямлена так, щоб зменшити деформацію.

Сила реакції опори — сила пружності, яка діє на тіло з боку опори перпендикулярно до її поверхні.

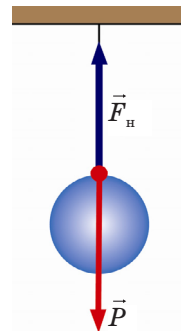
Якщо на звичайній нитці підвісити тягарець, у нитці також виникає сила пружності, хоча деформації нитки ми можемо й не помітити. Цю силу називають силою натягу \vec{T} . Саме ця сила компенсує вагу \vec{P} і не дає нитці розірватися (мал. 14.3).

Сила натягу — це сила пружності, що діє на тіло з боку підвісу.

Тіл, які не деформувалися б, у природі не існує. Водночас часто доводиться мати справу з такими малими деформаціями, що їх важко виявити. Наприклад, якщо наступити на цеглину, то її висота зменшиться приблизно на $0,00005$ см. За такої деформації сусідні атоми наближаються один до одного приблизно на $2 \cdot 10^{-14}$ см. Далі ми розглянемо властивості сил пружності в тілах (пружинах, гумових джгутках тощо), які зазнають істотних деформацій при дії на них зовнішніх сил.

ЗАКОН ГУКА. Для пружних деформацій англійським ученим Р. Гуком у 1660 р. експериментально встановлений закон, який названо його ім'ям.

Сила пружності, яка виникає під час пружної деформації тіла, прямо пропорційна видовженню тіла і напрямлена у бік, протилежний до напрямку переміщень частинок тіла під час деформації.



Мал. 14.3. Сила натягу нитки протидіє вазі тіла

$$F_{\text{пр}x} = -kx,$$

де k — коефіцієнт пружності, або жорсткість, його значення залежить від розмірів та матеріалу тіла, одиницею коефіцієнта пружності є ньютон на метр $[k] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$; x — абсолютна деформація (абсолютне видовження тіла Δl).

Знак «мінус» показує, що напрям сили пружності протилежний напрямку зміщення краю деформованого тіла.

Жорсткість — здатність тіла або конструкції протидіяти виникненню деформацій при заданому типі навантаження: чим більша жорсткість, тим менша деформація при тій же силі.

Під жорсткістю розуміють також коефіцієнт пропорційності k у формулі закону Гука.

Явище пружної деформації використовують у приладах для вимірювання сили — динамометрах (або силомірах). Конструкції динамометрів різноманітні, але принцип їхньої роботи однаковий: у них використано властивість тіл подовжуватись, згинатись чи стискатись за пружної деформації прямо пропорційно до величини прикладеної сили.

! Головне в цьому параграфі

Абсолютне видовження — фізична величина, що показує зміну розмірів тіла під дією зовнішніх сил. Абсолютне видовження позначають літерою x або ж Δl , одиницею абсолютного видовження в СІ є метр:

$$x = \Delta l = l - l_0.$$

Відносне видовження — фізична величина, що показує, яку частину від початкового розміру l_0 становить абсолютне видовження Δl .

Відносне видовження позначається грецькою літерою «епсILON» (ε) Відносне видовження є безрозмірною величиною. $|\varepsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0} = \frac{|l - l_0|}{l_0}$. Закон Гука:

сила пружності, яка виникає під час пружної деформації тіла, прямо пропорційна видовженню тіла і напрямлена у бік, протилежний до напрямку переміщень частинок тіла під час деформації: $F_{\text{пр}x} = -kx$.

? Запитання для самоперевірки

1. За яких умов виникає сила пружності?
2. За яких умов виникає деформація тіла?
3. Що називають силою реакції опори; силою натягу?
4. Унаслідок чого з'являється сила пружності? Яка природа цієї сили?
5. Що таке деформація? За яких умов виникають деформації тіл?
6. Яку деформацію називають пружною, а яку — пластичною? Назвіть види деформації?
7. Що таке реакція опори або підвісу?
8. Як формулюється і записується закон Гука? Що означає знак «мінус» у формулі закону Гука?

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №4

Розглядаючи руху тіл під дією кількох сил, зверніть увагу на такі особливості:

1. Коли в задачі йдеться про рух системи пов'язаних між собою тіл, рівняння руху для кожного тіла записують окремо. Одержані рівняння розв'язують як систему. Якщо тіла зв'язані ниткою, передбачається, що нитки нерозтяжні й невагомі, блоки також невагомі. Це пояснюється тим, що нерозтяжність нитки, яка зв'язує тіла, означає відсутність її видовження, отже, і виникнення внаслідок деформації додаткових сил пружності. Це дає підставу вважати, що сила натягу нитки скрізь залишається незмінною, і прискорення, надане цією силою, не змінюється. Невагомість нитки вказує на те, що діючі сили натягу нитки рівні між собою. За наявності блока рівність натягу нитки виконується лише в тому випадку, коли масами нитки та блока а також тертям під час обертання блока можна знехтувати.

2. Після розв'язання рівнянь і запису розв'язку в загальному вигляді визначаються числові значення шуканих величин, оцінюється їх реальність, тобто застосовується загальний алгоритм процесу розв'язування задач. Рекомендується продумати можливість знаходження інших способів розв'язання задач, порівняння здобутих результатів.

3. Розглянемо найтипівіші випадки різних ситуацій.

Перша ситуація стосується руху тіла під дією сили F . Усі сили діють на тіло, але можна вказати лише ті сили, які впливають на прямолінійний рух.

Друга ситуація. На тіло діє, крім сили F , сила тертя.

Третя ситуація. Тіло рухається з прискоренням вгору. Діаграми сил відрізняються, а рівняння руху у векторній формі однакові. Але в проєкціях на вісь координат вони різні. Ці ситуації стосуються розв'язування задач на невагомість і перевантаження.

Четверта ситуація. Тіло рухається вгору по похилій площині з прискоренням, спрямованим паралельно площині.

П'ята ситуація стосується руху системи тягарців відносно осі координат, вектори сил проєктуються на напрям руху. Вважаємо блок та нитку невагомими, саму нитку — нерозтяжною, тобто $T_1 = T_2 = T$; $a_1 = a_2 = a$. Перший випадок враховує всі сили, що діють на тіло, а у другому сили взаємодії тягарця та додатка до нього не розглядаються, оскільки вважаються внутрішніми. На малюнках центри мас тягарців відокремлені для кращого унаочнення ситуації.

Шоста ситуація. Якщо тіла рухаються по колу під дією сил: а) тертя, б) тяжіння, в) пружності, їх рух описується одним і тим самим рівнянням у векторній формі.

Сьома ситуація стосується руху конічного маятника та тіла (потяга, велосипедиста та ін.) на заокругленні, які описуються однаковим рівнянням.

Восьма ситуація розглядає рух автомобіля по увігнутому або опуклому мосту радіусом r , а також рух тіла по колу у вертикальній площині під дією сили пружності. Вони описуються за допомогою рівнянь, що

у векторній формі однакові для цих випадків, але в проекціях на вертикальну вісь координат різні.

Розглянемо ці ситуації на конкретних прикладах.

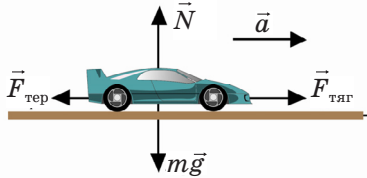
Задача 1. На автомобіль масою 1 т під час руху діє сила тертя, що дорівнює 0,1 його сили тяжіння. Чому має дорівнювати сила тяги, яку розвиває мотор автомобіля, щоб автомобіль рухався: а) рівномірно; б) з прискоренням 2 м/с^2 ?

Дано:
 $m = 1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$
 $F_{\text{оп}} = 0,1mg$
 $a_1 = 0$
 $a_2 = 2 \text{ м/с}^2$

$F_{\text{тяг1}} - ?$
 $F_{\text{тяг2}} - ?$

Розв'язок

Зобразимо на рисунку сили, що діють на тіло: силу тяжіння mg , силу нормальної реакції опори N , силу тяги $F_{\text{тяг}}$ і силу опору рухові $F_{\text{оп}}$.



Мал. 1. До задачі 1

За другим законом Ньютона $\vec{F}_{\text{тяг}} + \vec{F}_{\text{оп}} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$.

Розглянемо перший випадок: автомобіль рухається рівномірно, тобто $a = 0$, отже, в проекції на вісь OX , що збігається з напрямком руху, рівняння має вигляд: $F_{\text{тяг}} - F_{\text{оп}} = 0$; звідки $F_{\text{тяг1}} = F_{\text{оп}}$; $F_{\text{тяг1}} = 0,1mg$; $F_{\text{тяг1}} = 0,1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 = 980 \text{ Н}$. У другому випадку воно має вигляд: $\vec{F}_{\text{тяг2}} = \vec{F}_{\text{оп}} + m\vec{a}$; підставивши числові значення отримаємо:

$$F_{\text{тяг2}} = 980 \text{ Н} + 1000 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с}^2 = 2980 \text{ Н}.$$

Відповідь: сила тяги автомобіля під час рівномірного руху 980 Н; під час прискореного 2980 Н.

Задача 2. По горизонтальній площині рухається тіло масою $m = 5 \text{ кг}$ під дією сили $F = 30 \text{ Н}$, напрямленої під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту. Коефіцієнт тертя ковзання тіла по площині $\mu = 0,2$. Яку швидкість матиме тіло через 10 с після початку дії сили, якщо спочатку тіло було в спокої?

Дано:
 $m = 5 \text{ кг}$
 $F = 30 \text{ Н}$
 $\alpha = 30^\circ$
 $\mu = 0,2$
 $t = 10 \text{ с}$
 $v - ?$

Розв'язок

Систему відліку пов'язуємо з поверхнею, по якій рухається тіло, одну вісь координат спрямовуємо в горизонтальному напрямі в бік руху тіла, а другу — вертикально вгору (див. мал. 2 до задачі 2).

На тіло під час руху діють такі сили: сила тяжіння mg , сила реакції площини (опори) N , сила тяги F , сила тертя $F_{\text{тер}}$.

Прискорення руху тіла збігається з напрямом його руху. Запишемо рівняння руху цього тіла:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тер}}$$

У проекціях на координатні осі воно матиме вигляд:

На вісь OX : $ma = F \cos \alpha - F_{\text{тер}}$

На вісь OY : $0 = -mg + N + F \sin \alpha$ або $N = mg - F \sin \alpha$.

(Оскільки в напрямі осі OY тіло не переміщується, $a = 0$, сума проекцій сил в цьому напрямі дорівнює нулю.)

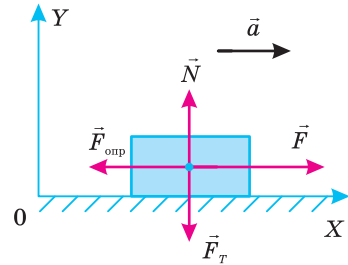
Пригадаємо, що сила тертя визначається за формулою $F_{\text{тер}} = \mu N$. Підставляючи її в попереднє рівняння і розв'язавши систему двох рівнянь, знаходимо прискорення руху тіла:

$$a = \frac{F \cos \alpha - \mu mg + \mu F \sin \alpha}{m}$$

і визначаємо швидкість руху:

$$v = at = \frac{(F \cos \alpha - \mu mg + \mu F \sin \alpha)t}{m}; \quad v \approx 38,3 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $v \approx 38,3 \text{ м/с.}$



Мал. 2. До задачі 2

Задача 3. По похилій площині вгору рухається тіло масою $m_1 = 2 \text{ кг}$ під дією зв'язаного з ним нерозтяжною і невагомою ниткою тягарця масою $m_2 = 20 \text{ кг}$, який перекинута через невагомий блок, що обертається без тертя. Початкова швидкість тіл дорівнює нулю, коефіцієнт тертя між першим тілом і площиною: $\mu = 0,1$. Кут нахилу площини до горизонту $\alpha = 30^\circ$. Визначити прискорення руху тіла та силу натягу нитки.

Дано:

$m_1 = 2 \text{ кг}$

$m_2 = 20 \text{ кг,}$

$\mu = 0,1$

$\alpha = 30^\circ$

$T - ?; a - ?$

Розв'язок

На тіло, що рухається по похилій площині, діє сила тяжіння $F_T = m_1 g$, сила натягу нитки T_1 , сила тертя $F_{\text{тер}}$ і сила реакції площини N . На тягарець діють: сила тяжіння $F_{m_2} = m_2 g$ і сила натягу нитки T_2 .

Для кращого розуміння розв'язання цієї задачі виконайте самостійно рисунок, зобразивши на ньому всі сили.

З умови нерозтяжності та невагомості нитки випливає, що $a_1 = a_2 = a$; і $T_1 = T_2 = T$.

Оберемо для першого тіла систему відліку, пов'язану з площиною. Вісь OX спрямуємо вгору в напрямі руху, вісь OY — перпендикулярно до площини.

Тоді рівняння руху тіла у проекціях на осі координат матиме вигляд:

$$T_{1x} + N_x + F_{\text{тер}x} + F_{\text{тер}x} = m_1 a_x; \quad N_y + F_{\text{тер}y} = m_1 a_y.$$

Враховуючи, що $T_{1x} = T, N_x = 0,$

$$F_{\text{тер}x} = -m_1 g \sin \alpha, a_y = 0, F_{\text{тер}y} = -F_{\text{тер}} = -\mu N,$$

$$a_x = a_1, N_y = N, F_{\text{тер}y} = -m_1 g \cos \alpha,$$

одержуємо:

$$T - m_1 g \sin \alpha - \mu N = m_1 a;$$

$$N - m_1 g \cos \alpha = 0.$$

Для тягарця обираємо вісь OX_1 , напрямлену в напрямку його руху. Рівняння руху тягарця m_2 буде мати вигляд:

$$m_2 g - T = m_2 a.$$

Розв'язуємо одержану систему рівнянь відносно a . У результаті перетворень одержуємо:

$$a = -\frac{g[m_2 - m_1(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)]}{m_1 + m_2}; \quad a \approx 8,4 \text{ м/с}^2;$$

Силу натягу знаходимо, підставляючи у формулу одержаний вираз прискорення:

$$T = \frac{m_1 m_2 g(1 + \sin\alpha + \mu\cos\alpha)}{m_1 + m_2}; \quad T \approx 28,2 \text{ Н.}$$

Відповідь: $a \approx 8,4 \text{ м/с}^2$; $T \approx 28,2 \text{ Н.}$

Задача 4. Через нерухомий блок перекинута шнур, до одного кінця якого прив'язано вантаж масою m_1 , а до іншого — два вантажі $m_2 = 0,15 \text{ кг}$ і $m_3 = 0,05 \text{ кг}$. Маса $m_1 > m_2 + m_3$. Система рухається з прискоренням $2,0 \text{ м/с}^2$. Визначити масу першого вантажу і силу пружності шнура між тілами з масами m_2 і m_3 . Масами шура і блока, а також тертям у блоці можна знехтувати. Шнур вважати нерозтяжним.

Дано:

$$\begin{aligned} m_2 + m_3 &< m_1 \\ m_2 &= 0,15 \text{ кг} \\ m_3 &= 0,05 \text{ кг} \\ a &= 2,0 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_1 &— ? \\ F_3 &— ? \end{aligned}$$

Розв'язок

Запишемо другий закон Ньютона для кожного з тіл

$$m_1 \vec{a} = \vec{F}_1 + m_1 \vec{g}; \quad m_2 \vec{a} = \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + m_2 \vec{g};$$

$$m_3 \vec{a} = \vec{F}_4 + m_3 \vec{g}.$$

Спроекуємо рівняння на координатну вісь:

$$m_1 a = -F_1 + m_1 g,$$

$$-m_2 a = -F_2 + F_3 + m_2 g,$$

$$-m_3 a = -F_4 + m_3 g.$$

Ця система трьох рівнянь має п'ять невідомих: m_1 , F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , але, якщо виходити з умов задачі про невагомість і нерозтяжність шнура, модулі сил F_2 і F_4 можна замінити на, відповідно, рівні їм модулі сил F_1 і F_3 . Це дає змогу одержати систему трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$\text{З першого рівняння: } F_1 = m_1(g - a);$$

$$\text{отже, } F_2 = F_1 = m_1(g - a).$$

Додаємо почленно друге і третє рівняння:

$$-a(m_2 + m_3) = -F_2 + F_3 - F_4 + g(m_2 + m_3);$$

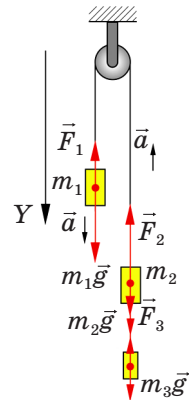
$$-a(m_2 + m_3) = -m_1(g - a) + g(m_2 + m_3);$$

$$a(m_2 + m_3) = m_1(g - a) - g(m_2 + m_3);$$

$$(m_2 + m_3)(a + g) = m_1(g - a);$$

$$m_1 = \frac{(m_2 + m_3) \cdot (a + g)}{g - a};$$

$$F_3 = m_3(g + a).$$



Мал. 3.
До задачі 4

Обчислимо значення маси першого вантажу та сили F_3 :

$$m_1 = \frac{0,2 \text{ кг} \cdot 11,8 \text{ м/с}^2}{7,8 \text{ м/с}^2} = 0,3 \text{ кг};$$

$$F_3 = 0,05 \text{ кг} \left(9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} + 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) \approx 0,6 \text{ Н}.$$

Відповідь: 0,3 кг; 0,6 Н.

Розв'язуючи задачі, які відповідають ситуаціям під час руху тіла по колу, слід пам'ятати, що під час рівномірного руху тіла по колу величина лінійної швидкості залишається сталою, але неперервно змінюється її напрям. (У кожній точці траєкторії вектор швидкості спрямований по дотичній до кола.) Отже, такий рух є рухом з прискоренням. Його надає тілу та сила (або рівнодійна декількох сил), яка спрямована до центра, за що вона одержала назву доцентрової, а прискорення, відповідно, доцентрового. Для цих випадків другий закон динаміки набуває вигляду:

$$ma = \sum F_i, \text{ де } a = \frac{v^2}{R} = 4\pi^2 v^2 R;$$

де R — радіус кола (або дуги кола), по якому рухається тіло;

$\sum F_i$ — сума складових усіх сил, які діють на тіло уздовж радіуса.

Якщо складова сили спрямована до центра, її проекцію беруть зі знаком плюс, а від центра — із знаком мінус.

Розглянемо випадки, коли роль доцентрової відіграє лише одна сила. Це може бути сила тертя (рух тіла на диску, що обертається навколо вертикальної осі), сила пружності (обертання кульки на нитці або стержні в горизонтальній площині), сила всесвітнього тяжіння (рух планет і супутників). Якщо точно, то планети і супутники рухаються по еліптичних, а не колових орбіт, але їхні орбіти дуже часто наближені до колових, що дає підставу в задачних ситуаціях розглядати цей рух як обертальний по колу.

Задача 5. Кулька масою m , прикріплена до нитки, рухається по колу в горизонтальній площині зі сталою швидкістю. Відстань від точки підвісу до площини становить 25 см. Скільки обертів зробить кулька за 10 с?

Дано:

$$l = 25 \text{ см} =$$

$$= 0,25 \text{ м}$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$N = ?$$

Розв'язок

На кульку діють дві сили: сила тяжіння $F_T = mg$ і сила натягу нитки T . Запишемо другий закон Ньютона у векторній формі: $\vec{F}_T + \vec{T} = m\vec{a}$ та у проекціях на осі координат:

$$T \sin \alpha = mv^2/R;$$

$$T \cos \alpha - mg = 0.$$

Перетворимо ці рівняння: $T \cos \alpha = mg$. Поділимо ліві й праві частини і одержимо: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{Rg}$.

З мал. 4 видно, що $\operatorname{tg}\alpha = R/h$, отже, $\frac{R}{h} = \frac{v^2}{gR}$;

але $v = \omega R = \frac{2\pi R}{T}$, де T — період обертання,

тому можна записати: $\frac{R}{h} = \frac{4\pi^2 R}{gT^2}$.

З цієї залежності знаходимо значення T :

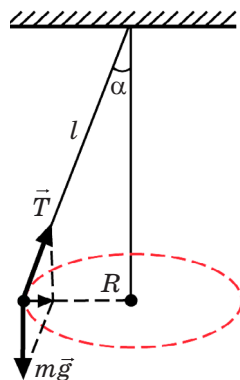
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}}.$$

Кількість обертів, що здійснила кулька за час t :

$$N = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}.$$

$$N = \frac{10 \text{ с}}{2\pi} \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0,25 \text{ м}}} \approx 10.$$

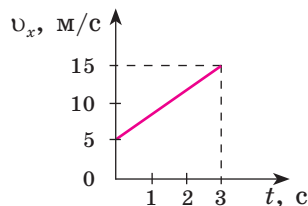
Відповідь: кулька здійснила кулька 10 обертів.



Мал. 4.
До задачі 5

Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (с). На аркуш паперу помістили склянку з водою. Якого прискорення необхідно надати аркушу паперу, щоб склянка з водою рухалася назад відносно паперу (граничний коефіцієнт тертя спокою вважати рівним коефіцієнту тертя ковзання)?
- 2 (с). Що має зробити водій під'їжджаючи до крутого повороту? Чому необхідно бути особливо уважним на слизькій дорозі?
- 3 (с). Користуючись графіком, визначте, як рухається потяг і яка сила тяги локомотива, коли відомо, що маса потяга 2500 т, а коефіцієнт тертя 0,025.
- 4 (д). Сани масою 60 кг рівномірно з'їжджають з гори, схил якої становить 40 м на кожні 100 м довжини. Визначте коефіцієнт тертя саней.
- 5 (д). Натирач підлог масою 10 кг штовхають перед собою за допомогою ручки, яка утворює з горизонтом кут 30° . Найменша сила, яку треба спрямувати вздовж ручки натирача, щоб зрушити його з місця, дорівнює 50 Н. Визначте коефіцієнт тертя між підлогою та натирачем.
- 6 (д). Стальний магніт масою 50 г прилип до вертикальної сталюї плити. Для рівномірного ковзання магніту вниз прикладають силу 1,5 Н. З якою силою магніт притискається до плити? Яку силу необхідно прикласти, щоб переміщувати магніт по плиті вертикально вгору, якщо коефіцієнт тертя дорівнює 0,2?



- 7 (д).** Коли пружину розтягнуто силою 2 Н, її довжина становить 10 см. Якщо силу збільшити до 5 Н, то довжина пружини збільшується до 12 см. Знайдіть довжину нерозтягнутої пружини
- 8 (д).** Тягарець масою 50 г прикріплений до гумового джгута завдовжки 50 см. Обертаючись у горизонтальній площині він видовжує жгут на 5 см. Визначте жорсткість джгута, якщо частота обертання 60 об/хв.
- 9 (д).** Знайдіть найменший радіус дуги кола автомобіля, який рухається по горизонтальній дорозі зі швидкістю 36 км/год, якщо коефіцієнт тертя коліс об дорогу 0,25.
- 10 (д).** Автомобіль масою 14 т, рушаючи з місця, проходить перші 50 м за 10 с. Визначте силу тяги автомобіля, якщо коефіцієнт опору дорівнює 0,05.
- 11 (д).** Спортсмен масою 65 кг, стрибаючи з десятиметрової вежі, входить у воду зі швидкістю 13 м/с. Визначте середню силу опору повітря
- 12 (д).** Похила площина має кут нахилу 30° . За яких значень коефіцієнта тертя тягти вантаж по похилій площині важче, ніж піднімати його вертикально?
- 13 (д).** З яким прискоренням рухається брусок по похилій площині з кутом нахилу 30° якщо коефіцієнт тертя 0,02?
- 14 (д).** Автомобіль масою 2 т рухається зі швидкістю 36 км/год. Визначте вагу автомобіля, коли він проходить по випуклому мосту з радіусом кривизни 40 м.
- 15 (д).** З якою максимальною швидкістю може їхати мотоцикліст по горизонтальній площині, описуючи коло радіусом 100 м, якщо коефіцієнт тертя гуми по дорозі 0,4? На який кут від вертикалі відхиляється мотоцикліст під час проходження повороту?
- 16 (д).** Доріжка для велосипедних гонок в місці закруглення має кут нахилу 40° . На яку швидкість їзди розраховано такий нахил доріжки, якщо радіус закруглення 40 м?
- 17 (в).** Гелікоптер масою 30 т піднімає на тросах вертикально вгору вантаж масою 10 т з прискоренням 1 м/с^2 . Визначте силу тяги гелікоптера та силу, яка діє на гелікоптер у місці приєднання тросів.
- 18 (в).** Через невагомий блок перекинута мотузку з вантажами 1 т і 2 т. Блок рухається вгору з прискоренням a . Нехтуючи тертям, знайдіть тиск блока на вісь, на якій він знаходиться.
- 19 (в).** По легкому клину з кутом нахилу α , котрий лежить на горизонтальній підлозі, ковзає тіло. Коефіцієнт тертя між клином і підлогою μ . Визначте мінімальне значення коефіцієнта тертя μ_1 між тілом та клином, щоб клин залишався нерухомим. Масою клина знехтувати.

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№3)

- 1 (п).** Вага — це:
- А** ... міра інертних властивостей тіла.
- Б** ... міра гравітаційної взаємодії тіла з Землею.
- В** ... сила, з якою Земля діє на тіло біля її поверхні.
- Г** ... сила, з якою тіло діє на опору або підвіс внаслідок притягання Землі.

2 (п). Яка з наведених формул є записом третього закону Ньютона?

А

$$F = -k\Delta l$$

Б

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

В

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Г

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

3 (п). Установіть відповідність «фізична величина — позначення фізичної величини».

1 Жорсткість

А k

2 Коефіцієнт тертя

Б F

3 Відносне видовження

В μ

4 Сила

Г x Д ε

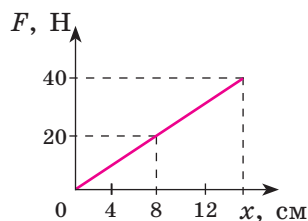
4 (с). На рисунку зображено графік залежності сили пружності від видовження пружини. Знайдіть жорсткість пружини.

А 2,5 Н/м

Б 250 Н/м

В 160 Н/м

Г 0,025 Н/м



5 (с). На Землі хлопчик може вільно підняти тіло, вага якого 100 Н. Яка маса цього тіла?

А

100 кг

Б

10 кг

В

1 кг

Г

100 г

6 (с). Як зміниться сила гравітаційної взаємодії між двома матеріальними точками, якщо відстань між ними збільшити в 3 рази?

А Збільшиться в 3 рази

Б Зменшиться в 6 разів

В Зменшиться в 9 разів

Г Зменшиться в 3 рази

7 (д). Футбольний м'яч кинули з початковою швидкістю 20 м/с під кутом 45° до горизонту. На яку максимальну висоту підніметься м'яч?

8 (д). Кулька масою 0,2 кг на нитці завдовжки 0,3 м обертається в горизонтальній площині. Визначте силу пружності нитки і швидкість кульки, якщо нитка утворює з вертикаллю кут 60° .

9 (д). На одному кінці мотузка, перекинута через нерухомий блок, висить вантаж масою 35 кг, а на другому кінці — вантаж масою 70 кг. Яка вага першого та другого вантажів?

10 (в). Чому має дорівнювати мінімальний коефіцієнт тертя між шинами і поверхнею дороги з нахилом 30° , щоб автомобіль міг рухатись по ній угору з прискоренням 1 м/с^2 .

§ 15. Рівновага тіл

- ▶ Умови рівноваги
- ▶ Центр тяжіння та центр мас тіла
- ▶ Види рівноваги. Стійкість тіл

УМОВИ РІВНОВАГИ. У повсякденному житті часто виникає потреба розрахувати сили, які діють на різні частини механізмів і споруд, створених людиною, і це визначає необхідність з'ясувати, де вони мають бути прикладені, щоб забезпечити виконання конкретних завдань.

У попередніх параграфах ми розглядали рух тіла під дією кількох сил і визначали прискорення, яких набувають тіла під їхнім впливом. Проте у деяких випадках тіло, яке перебуває під дією кількох сил, може залишатися у стані рівноваги.

Рівновагою називають такий стан тіла, за якого воно перебуває у спокої або рухається рівномірно.

Варто розуміти, стан рівноваги не означає, що тіло обов'язково повинне перебувати в спокої, воно може здійснювати рівномірний поступальний рух або рівномірно обертатися. Стан спокою є окремим його випадком.

Вивчення умов рівноваги тіл (або, іншими словами, рівноваги сил) має велике значення для багатьох галузей техніки, виробництва і побуту. Без цих знань не можна обійтися, споруджуючи будинки, мости, верстати, використовуючи будівельні крани, різні підйомники, механічні пристрої тощо.

Розділ механіки, в якому розглядаються умови рівноваги тіл під дією прикладених сил, називається статикою.

Статика почала розвиватись у стародавні часи, бо вже тоді почали використовувати механічні пристрої (блоки, важелі, похилу площину тощо) для піднімання і пересування вантажів, і тогочасних інженерів цікавили питання не тільки умов рівноваги тіл, а й можливого напрямку їх руху.

Ознайомимося з умовами рівноваги твердих тіл. Розглянемо умови рівноваги тіл для двох випадків: за відсутності обертання та для тіла, що має вісь обертання.

Умова рівноваги тіла, що може рухатися поступально, впливає з другого закону Ньютона: $\sum_i \vec{F} = m\vec{a}$. Якщо $\sum_i \vec{F} = 0$, і початкова швидкість дорівнює нулю, тіло в цій системі відліку перебуватиме у спокої. Отже, рівновага тіла, яке може переміщатися в довільному напрямі, настає, якщо векторна сума усіх сил, що дають на нього, дорівнює нулю.

У цьому випадку і сума проекцій усіх сил на будь-який напрям дорівнює нулю. Таким чином, можна дати і таке формулювання: умовою

рівноваги тіла, що не може обертатися, є рівність нулю суми проєкцій всіх прикладених до нього сил на будь-яку координатну вісь.

Розглянемо умову рівноваги тіла, що може обертатися навколо осі. Колеса та вали різних машин і механізмів, лопаті турбін, пропелери літака, рулі транспортних засобів тощо закріплюють так, щоб вони могли здійснювати лише обертальний рух. Розглянемо, за яких умов тіло, закріплене на осі, перебуватиме в рівновазі.

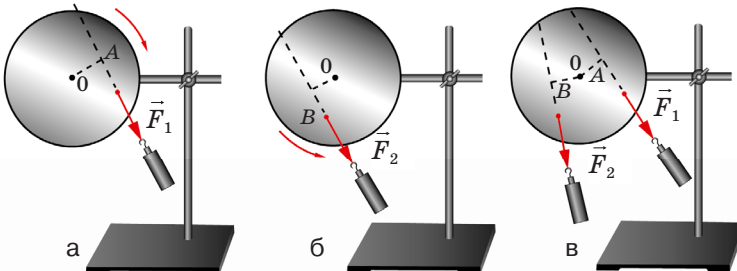
Виявляється, що для статичної рівноваги тіла, яке може обертатися навколо осі, умова рівності нулю всіх прикладених до нього сил є необхідною, але недостатньою. Справді, якщо на тіло діє пара сил (дві рівні за модулем, але протилежно спрямовані сили, точки прикладання яких не збігаються), їх векторна сума дорівнює нулю, отже, названа умова рівноваги виконується, однак стан тіла може змінитися. Пара сил, прикладена до нерухомого тіла, викликає його обертання.

Постає питання, яка ще умова має виконуватися, щоб таке тіло зберігало рівновагу? Аби відповісти на нього, розглянемо спочатку результат дії однієї сили на тіло, закріплене на осі. Виявляється, що не будь-яка сила спричинить обертання тіла, якщо воно перебуває в спокої, а сили, однакові за величиною, але прикладені в різних точках або різні за напрямом, викликають різні наслідки. У цьому можна переконатися, якщо спостерігати за обертанням тіла навколо осі, прикріпивши в будь-якій його точці динамометр. При однаковому натягу динамометра, але за умови різного його спрямування, рух тіла може дуже відрізнятися (мал.15.1). У положенні *a* тіло почне повертатися за годинниковою стрілкою, у положенні *b* — проти стрілки годинника.

Сила, яка діє на тіло, закріплене на осі, може спричинити його поворот або обертання лише тоді, коли напрям її дії не проходить через вісь обертання.

Водіям різних транспортних засобів це твердження добре відоме з практики: прикладаючи зусилля вздовж радіуса керма, його повернути не вдасться, але цього легко досягти, діючи на рульове колесо перпендикулярно до радіуса.

Обертальна дія двох сил на тіло, яке має нерухому вісь, однакова, якщо під їх дією тіло зберігає рівновагу. Це можливо лише за умови, коли діючи поодиноці, ці сили повертають тіло у протилежних напрямках (мал. 15.1, в).



Мал. 15.1. Тіло під дією пари сил.

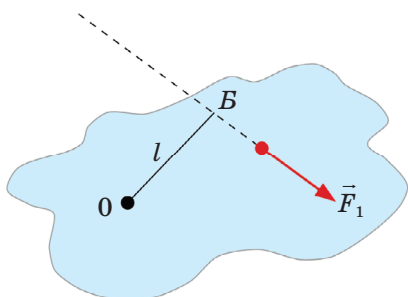
Для рівноваги тіла, що має вісь обертання, істотними є не лише значення сил, а й відстані лінії дії цих сил до осі обертання. Мала сила, прикладена подалі від осі, може зрівноважити дію великої сили, прикладеної ближче до осі. У розглядуваному на мал. 16.1 прикладі рівновага настає, коли добуток модуля сили на відстань від осі до точки її прикладання (радіус точки кріплення) для обох діючих сил однаковий. Якщо позначити діючі сили через F_1 і F_2 , а довжини радіусів, проведених у точки їх прикладання через l_1 і l_2 , цю умову рівноваги можна записати у такий спосіб:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2.$$

Найкоротшу відстань від осі обертання до лінії дії сили називають плечем сили l (мал. 15.2).

Таким чином, оберտальна дія сили залежить від величини і плеча цієї сили.

Добуток сили на плече називається моментом сили відносно осі обертання:



Мал. 15.2. Плече сили — l

$$M = Fl.$$

Виходячи з цієї формули, можна визначити одиницю моменту сили:

$$[M] = 1\text{Н} \cdot 1\text{м} = 1\text{Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сили — величина, яка характеризує оберտальну дію сили. Якщо лінія дії сили проходить через вісь обертання: $l = 0$, то момент цієї сили: $M = 0$. Як ми переконалися на досліді, ця сила не викликає оберտання тіла.

У побуті ми часто маємо враховувати дію моментів сил. Один і той самий момент сили можна створити малою силою, плече якої велике, і великою силою з малим плечем. Діючи гайковим ключем, відкриваючи двері, натискаючи на педаль велосипеда, ми створюємо оберտальний момент. Щоб при цьому докласти найменше зусиль, слід прикласти силу якомога далі від осі обертання.

У СІ за одиницю моменту сили приймається момент сили в 1 Н, що має плече в 1 м.

Щоб відрізнити моменти сил, які викликають оберտання в протилежних напрямках, домовилися вважати моменти сил, які обертають тіло проти годинникової стрілки, — від'ємними, а моменти сил, які обертають тіло за стрілкою годинника, — додатними.

Отже, тіло з нерухомою вісю обертання перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю. Його можна записати в такий спосіб:

$\Sigma M = 0$. Для обертального руху момент сили відіграє таку саму роль, як сила для поступального руху.

Тепер ми можемо узагальнити умови рівноваги тіл під дією кількох сил.

Щоб тіло перебувало в рівновазі, мають виконуватися одночасно дві умови:

1) сума всіх сил, які діють на тіло, має дорівнювати нулю:

$$\Sigma F = 0;$$

2) алгебраїчна сума моментів усіх сил відносно даної осі обертання має дорівнювати нулю: $\Sigma M = 0$.

З правила моментів можна вивести умову рівноваги важеля: важіль перебуває в рівновазі, якщо діючі на нього сили обернено пропорційні плечам

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

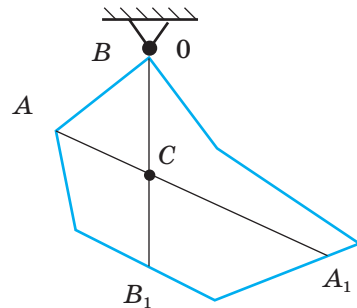
Історично склалося так, що люди використовували важелі ще в стародавні часи, задовго до розроблення їх теорії. Найвидатніший давньогрецький вчений Архімед (287—212 р. до н.е.), який першим заклав основи сучасної механіки, вивів закон важеля, тим самим поклавши початок вчення про рівновагу твердих тіл — статyki.

Знання умов рівноваги необхідні як для розуміння дії простих механізмів (блока, важеля, ворота, гвинта тощо), так і для розрахунків складних споруд і механізмів. Умова рівності нулю рівнодійної для постійної рівноваги сил має виконуватися не лише для всієї конструкції, наприклад, мосту чи крану, а й для кожної окремої деталі конструкції, таких як стріла крана, опора моста тощо.

ЦЕНТР ТЯЖІННЯ ТА ЦЕНТР МАС ТІЛА. Тверде тіло можна поставити на стіл або підвісити на шнурі так, що воно перебуватиме у рівновазі, тобто не буде ані рухатися поступально, ані обертатися. Це означатиме, що рівнодійна сил тяжіння, що діють на всі точки тіла, і сил пружності з боку опори, дорівнює нулю. І сума моментів усіх сил діють на нього теж дорівнює нулю.

Отже, сила тяжіння всього тіла і сила пружності зрівноважені. Оскільки у цьому випадку момент сили пружності дорівнює нулю за будь-якого положення тіла, то момент сили тяжіння має дорівнювати нулю.

Виходячи з цього, точка прикладання сили тяжіння має лежати на вертикалі, яка проходить через точку закріплення тіла. Це дає можливість визначити центр тяжіння будь-якого плоского тіла дослідним шляхом: підвісимо тіло за довільно вибрану точку і у стані рівноваги тіла проведемо через цю точку вертикаль (мал. 15.3). Шуканий центр має знаходитися на цій вер-



Мал. 15.3. Визначення центра тяжіння

тикалі. Далі обираємо нову точку підвісу і проводимо нову вертикаль. Центр тяжіння має лежати і на цій вертикалі. Повторимо цю дію втретє. Оскільки центр тяжіння має бути на всіх вертикалях, це означає, що треба знайти точку їх перетину. Це і буде центр тяжіння тіла.

Центром тяжіння тіла називають точку всередині тіла (або поза ним), відносно якої сума моментів сил тяжіння, які діють на окремі частини тіла, дорівнює нулю.

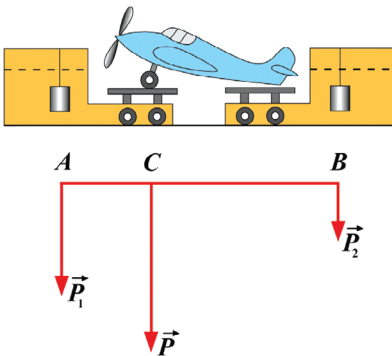
Центр мас (центр інерції) — точка, що характеризує розподіл мас у тілі або системі тіл, її положення залежить від розподілу маси в них.

Особливістю центра мас є його рух, як матеріальної точки в якій зосереджена вся маса тіла.

Положення центра мас тіла в однорідному полі тяжіння збігається з положенням його центра тяжіння. Наприклад, центр тяжіння кулі, диска, стержня, прямокутного паралелепіпеда знаходиться в геометричному центрі цих фігур. Він може міститися і поза тілом, як, приміром, у кільця.

Положення центру тяжіння може змінюватися, якщо змінюється форма тіла або речовина, з якої виготовлена окрема його частина. Так, якщо людина піднімає, наприклад, праву руку в горизонтальне положення, її центр тяжіння зміщується праворуч.

Знання положення центру тяжіння має велике практичне значення. Розрахунок положення центра тяжіння проектованої машини зазвичай проводять за схемою або кресленням, але він часто виявляється не до-



Мал. 15.4. Визначення центра тяжіння літака

суть точним і не збігається з положенням центра тяжіння готової машини. Зрозуміло, що за таких умов порушується безпека функціонування складних виробів. На практиці застосовують метод зважування готової машини одночасно на двох або трьох вагах. Наприклад, центр тяжіння літака визначається в такий спосіб: його ставлять на двоє терезів, відстань між якими відома і за показами яких, знаючи відстань, знаходять положення центру тяжіння літака. Цей метод широко застосовується в авіації, його називають центруванням (мал. 15.4).

ВИДИ РІВНОВАГИ. СТІЙКІСТЬ ТІЛ. Ви вже з'ясували умови рівноваги тіл відносно обраної системи відліку. Але виявляється, що цих умов недостатньо, аби тіла постійно перебували у такому стані. Якщо подивитися на тіла навколо нас: стілець, телевізор, картину на стіні, лампу під стелею і настільну лампу, хлібину і яйце, що лежать на столі, тощо,

зрозуміло, що всі вони перебувають у стані рівноваги. Однак варто лише невеликого поштовху, щоб побачити різницю в характері рівноваги цих предметів. Вони по-різному прагнуть зберегти своє положення. Так, настільна лампа навіть при невеликому відхиленні намагається повернутися у попередній стан, а лампа, підвішена на ланцюжку під стелею, повертається у попередній стан завжди.

Кулька на горизонтальній поверхні після поштовху не намагається ані повернутися у попереднє положення, ані віддалитися від нього. Залежно від того, як неістотні додаткові впливи позначаються на рівновазі тіл, розрізняють стійку, нестійку і байдужу рівновагу:

1) стійка рівновага — після її порушення тіло самочинно повернеться в це положення (мал. 15.5, а);

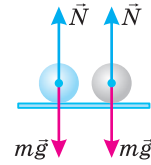
2) байдужа рівновага — тіло, після виведення його в сусіднє положення, залишиться в новому положенні (мал. 15.5, б).

3) нестійка рівновага — після її порушення тіло буде ще більше відхилятися від цього положення і не повертається до нього (мал. 15.5, в);

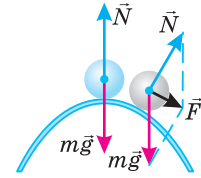
Якщо тіло перебуває у стані стійкої рівноваги, то під час відхилення його центр тяжіння піднімається. Якщо тіло перебуває у стані нестійкої рівноваги, то при відхиленні його центр тяжіння опускається. Якщо рівновага байдужа, центр тяжіння тіла під час відхилення не піднімається і не опускається. Під час перебування тіла в нестійкій рівновазі центр тяжіння займає найвище, а під час перебування у стійкій рівновазі — найнижче з можливих положень. Це означає, що потенціальна енергія тіла (або системи тіл) у стані нестійкої рівноваги має найбільше, а у стані стійкої рівноваги — найменше з можливих значень. Але будь-яка система намагається перейти у стійкий стан. Звідси випливає важливий висновок, який поширюється й на інші розділи фізики: будь-яка система намагається перейти у стан, який відповідає мінімуму її потенціальної енергії.

Стійкість тіла залежить від розмірів площі опори і розміщення центра тяжіння тіла. Чим більша площа опори і чим нижче міститься центр тяжіння, тим більша стійкість тіла.

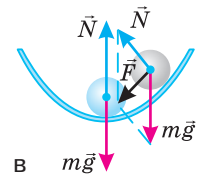
Стійкість тіла залежить від кута його нахилу: якщо вертикальна лінія, проведена через центр тяжіння, перетинає площу опори, то тіло зберігає свою рівновагу. В іншому випадку тіло втрачає стійкість (мал. 15.6).



а

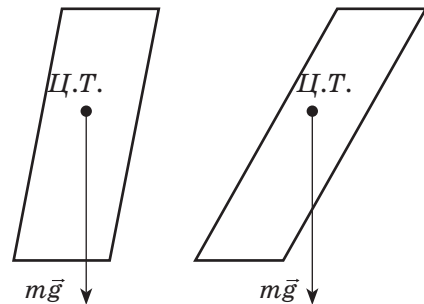


б



в

Мал. 15.5.
Види рівноваги



Мал. 15.6. Стійкість тіла зберігається, якщо вертикальна лінія, проведена через центр тяжіння перетинає площину опори

! Головне в цьому параграфі

Добуток сили на плече називається моментом сили відносно осі обертання. Момент сили — величина, яка характеризує обертальну дію сили, — позначається буквою M :

$$M = F \cdot l.$$

Одиницею вимірювання моменту сили є $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Щоб тіло перебувало в рівновазі, мають виконуватися одночасно дві умови:

- 1) сума всіх сил, які діють на тіло, має дорівнювати нулю: $\sum F = 0$;
- 2) алгебраїчна сума моментів усіх сил відносно цієї осі обертання має дорівнювати нулю: $\sum M = 0$.

Розрізняють стійку, нестійку та байдужу рівновагу.

Будь-яка система намагається перейти у стан, який відповідає мінімуму її потенціальної енергії, тобто у стійкий стан.

? Запитання для самоперевірки

1. Який стан тіла називається в механіці рівновагою?
2. Чи обов'язково рівновага означає стан спокою?
3. За яких умов прикладена до тіла сила може повернути його навколо закріпленої осі обертання?
4. Що називають плечем сили?
5. Що називають моментом сили? У яких одиницях він вимірюється?
6. Які умови необхідні та достатні для рівноваги тіла, що може обертатися навколо закріпленої вісі?
7. Де слід розміщувати вантаж під час завантажування пароплава або літака, щоб досягти найбільшої стійкості?
8. Хто має більшу стійкість: людина, яка сидить у човні, чи людина, яка стоїть у ньому? Поясніть.
9. У чому перевага двокорпусних суден (катамаранів) над звичайними суднами?
10. Поясніть, чому людина нахилиється вперед, піднімаючись у гору, і відхилиється назад, спускаючись з гори.

§ 16. Елементи механіки рідин і газів

- ▶ *Тиск рідин і газів*
- ▶ *Сполучені посудини. Гідравлічний прес*
- ▶ *Атмосферний тиск*
- ▶ *Закон Архімеда*
- ▶ * *Закон Бернуллі*

ТИСК РІДИН І ГАЗІВ. З курсу фізики 7-го класу вам відомо, що результат дії сили залежить не тільки від її модуля, а й від площі тієї поверхні, перпендикулярно до якої вона діє. Нагадаємо, що силу, яка діє перпендикулярно до поверхні називають силою тиску, F_{τ} .

Тиск — фізична величину, що чисельно дорівнює відношенню сили тиску (F_{τ}) до площі поверхні (S) вздовж якої діє ця сила.

$$p = \frac{F_{\tau}}{S}$$

Одиницею тиску в СІ є Паскаль $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$. Тиск вимірюють манометром.

На всі рідини на Землі діє гравітаційна сила, внаслідок чого рідина має вагу.

Тиск стовпа нерухокої рідини чи газу, що зумовлений їхньою вагою, називають гідростатичним тиском:

$$p = \rho gh$$

де h — висота стовпа рідини або газу над певним нульовим рівнем; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; ρ — густина рідини (газу).

Гідростатичний тиск стовпа рідини не залежить ні від площі дна, ні від форми посудини в якій міститься рідина. Явище непропорційності тиску рідини на дно посудини вазі налитой в неї рідини називають гідростатичним парадоксом, або парадоксом Паскаля (мал. 16.1). Тиск на дні всіх трьох посудин однаковий.

У 1648 році Б. Паскаль вставив у закриту діжку, наповнену водою, тонку трубку і, піднявшись на балкон другого поверху, влив у цю трубку кухоль води (мал. 16.1, б) Через малий діаметр трубки вода в ній піднялася до великої висоти, і тиск у діжці збільшився настільки, що кріплення діжки не витримали, і вона почала пропускати воду крізь щілини.

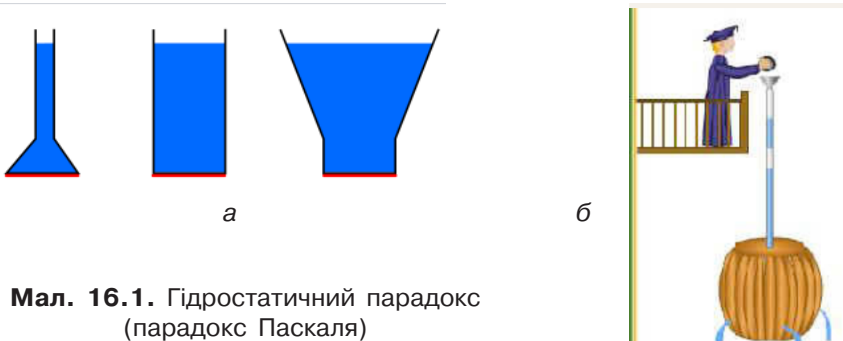
Крім того, Паскаль встановив, що зовнішній тиск, який чиниться на нерухому рідину або газ, передається ними в усіх напрямках однаково. Це твердження одержало назву закон Паскаля.

Із закону Паскаля випливає, що:

— якщо на поверхню рідини або газу площею S_1 діє зовнішня сила F_1 , то на поверхню площею S_2 діє зовнішня сила F_2 , причому

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} = p, \text{ де } p \text{ — тиск рідини або газу.}$$

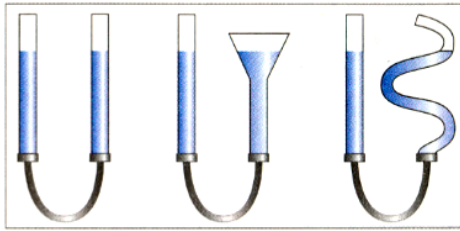
Повний тиск у будь-якій точці рідини дорівнює $p = p_0 + \rho gh$, де p_0 — тиск на відкритій поверхні рідини (зазвичай атмосферний тиск).



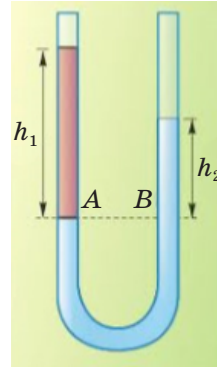
Мал. 16.1. Гідростатичний парадокс (парадокс Паскаля)

У стані рівноваги тиск усередині рідини або газу на одному рівні однаковий в усіх напрямках.

СПОЛУЧЕНІ ПОСУДИНИ. ГІДРАВЛІЧНИЙ ПРЕС. Виходячи із закону Паскаля можна пояснити співвідношення між рівнями рідини, наливої в сполучені посудини (мал. 16.2. а). Нагадаємо, сполученими посудинами називають посудини, з'єднані між собою в нижній їх частині так, що рідина може перетікати з однієї посудини в іншу.



а



б

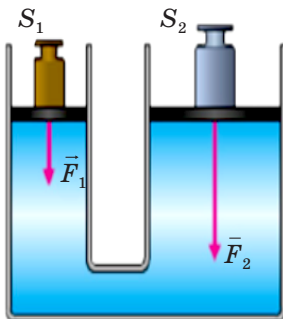
Мал. 16.2. Розподіл рівнів рідин у сполучених посудинах

У сполучених посудинах будь-якої форми поверхні однорідної рідини встановлюються на однаковому рівні (за умови, що тиск повітря над рідиною однаковий).

Якщо рідини мають різну густину, то висоти їх стовпів над рівнем розподілу цих рідин обернено пропорційні до їхніх густин.

Якщо в одну зі сполучених посудин наливо рідину однієї густини, а в другу — іншої, то при рівновазі рівні цих рідин не будуть однакові (мал. 16.2, б). У цьому випадку співвідношення між густинами рідин та їхніми висотами пов'язані між собою законом.

Висоти стовпів рідин над рівнем їхнього розподілу обернено пропорційні до густин цих рідин.



Мал. 16.3.
Гідравлічний прес

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Закон Паскаля дає змогу пояснити принцип дії гідравлічних машин. Основною їхньою частиною є два циліндри різного діаметра, забезпечені поршнями і сполучені трубкою. Простір під поршнями і трубку заповнюють рідиною (зазвичай мастилом).

Гідравлічну машину, в якій за допомогою гідравлічних циліндрів створюється велика стискаюча сила, називають гідравлічним пресом (мал. 16.3). Гідравлічний прес складається

з двох сполучених посудин різного діаметра, закритих поршнями і заповнених рідиною.

Виграш у силі, що дає гідравлічний прес, визначається за формулою:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

АТМОСФЕРНИЙ ТИСК. Планета Земля оточена газовою оболонкою — атмосферою. Молекули газів, які входять до складу атмосфери, перебувають у неперервному русі. Внаслідок гравітаційної взаємодії із Землею атмосфера діє з певною силою на тіла, що перебувають поблизу земної поверхні і зумовлюють атмосферний тиск.

Вперше атмосферний тиск виміряв у XVII ст. італійський учений Еванджеліста Торічеллі, учень Галілео Галілея (мал. 16.4).

Шари повітря біля поверхні Землі стиснуті шарами повітря, які лежать над ними. Чим вище від поверхні Землі шар повітря, тим менше він стиснутий, тим менша його густина, а отже, тим менший атмосферний тиск. Спостереження показують, що атмосферний тиск у місцевостях, які лежать на рівні моря, в середньому врівноважується ртутним стовпом у 760 мм рт. ст. за температури 0 °С. Цей тиск називають нормальним атмосферним тиском. Нормальний атмосферний тиск $p_{\text{ат}} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,300 \text{ Па}$.

Чим більша висота над рівнем моря, тим менший тиск.

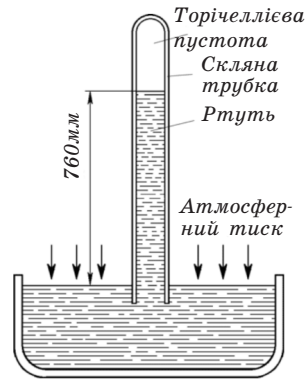
При невеликих підйомах у середньому на кожні 11 м підйому тиск зменшується на 1 мм рт. ст. = 133,3 Па.

Знаючи залежність тиску від висоти, можна за зміною показів барометра визначити висоту над рівнем моря.

Атмосферний тиск вимірюють барометром. Різницю між атмосферним тиском і тиском газу у резервуарі вимірюють манометром.

ЗАКОН АРХІМЕДА. Рідина або газ тисне на дно і стінки посудини. Якщо всередину рідини або газу помістити будь-яке тверде тіло, то воно також зазнаватиме тиску. Причому сила, з якою рідина або газ діє на нижню частину зануреного тіла, є більшою за силу, що діє на верхню частину. Отже, рівнодійна цих сил спрямована вгору і виштовхує тіло.

Силу, яка виштовхує тіло з рідини або газу, називають архімедовою силою на честь давньогрецького вченого Архімеда, який уперше довів існування цієї сили й обчислив її значення.



Мал. 16.4.
Вимірювання атмосферного тиску.
Дослід Торічеллі

Закон Архімеда. На тіло, занурене в рідину або газ, діє висхідна сила, яка дорівнює вазі рідини або газу в об'ємі зануреної частини цього тіла.

$$F_A = \rho_p g V,$$

де ρ_p — густина рідини або газу; V — об'єм зануреної частини тіла.

Отже, під час занурення тіла в рідину або газ його вага зменшується. Щоби визначити вагу тіла, зануреного в рідину, необхідно знайти різницю між його вагою в повітрі (P_0) та силою Архімеда (F_A):

$$P = P_0 - F_A.$$

Знаючи густину тіла і густину рідини, можна передбачити, як поводитиме себе тіло в рідині або газі:

— якщо густина тіла більша за густину рідини або газу, $\rho_t > \rho$, то воно тоне;

— якщо густина тіла дорівнює густині рідини або газу, $\rho_t = \rho$, то тіло плаває всередині рідини або газу;

— якщо густина тіла менша за густину рідини або газу, $\rho_t < \rho$, то тіло спливає.

* Закон Бернуллі. Під час руху рідини по трубах чи протоках за умови нестисливості рідини маса рідини, що проходить через поперечний переріз, проведений у будь-якій точці протоки чи труби є однаковою, тобто:

$$m_1 = m_2, \text{ або } v_1 S_1 = v_2 S_2,$$

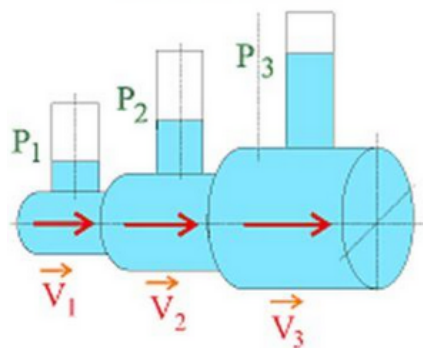
де v_1, v_2 — швидкості течії рідини чи газу через поперечний переріз протоки (труби); S_1, S_2 — площі поперечного перерізу протоки (труби).

Рівняння, яке визначає зв'язок між швидкістю течії v , тиском p та висотою (h) певного перерізу над певним рівнем певної точки в ідеальній рідині встановив у 1738 р. Даніель Бернуллі.

Закон Бернуллі: для стаціонарного потоку ідеальної рідини, яка не стискається, справедливим є рівняння, що визначає повний тиск рідини.

$$\rho gh + p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const},$$

де p — статичний тиск у поперечному перетині труби чи протоки; ρ — густина рідини; v — швидкість рідини через поперечний переріз протоки (труби); h — висота даного перерізу над певним рівнем.



Мал. 16.5. Закон Бернуллі.

* Для додаткового читання.

Наслідком закону Бернуллі є те, що під час протікання рідини по трубі змінного перерізу статичний тиск буде більшим там, де швидкість течії менша.

! Головне в цьому параграфі

Тиск стовпа нерухокої рідини чи газу, що зумовлений їхньою вагою, називають гідростатичним тиском. Він визначається за формулою: $p = \rho gh$, де h — висота стовпа рідини або газу над певним нульовим рівнем; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; ρ — густина рідини (газу).

Якщо рідини мають різну густину, то висоти їхніх стовпів над рівнем розподілу цих рідин обернено пропорційні до їхніх густин.

Закон Паскаля: зовнішній тиск, який чиниться на нерухому рідину або газ, передається ними в усіх напрямках однаково.

Закон Архімеда: на тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини або газу в об'ємі зануреної частини цього тіла:

$$F_A = \rho_p g V.$$

Вага тіла, зануреного в рідину, визначається різницею ваги тіла в повітрі (P_0) та сили Архімеда (F_A):

$$P = P_0 - F_A.$$

? Запитання для самоперевірки

1. Поясніть причину виникнення гідростатичного тиску. Від чого він залежить?
2. Чи залежить тиск рідини від форми посудини?
3. Чим зумовлений атмосферний тиск? В яких одиницях він вимірюється?
4. Поясніть будову та принцип дії гідравлічної машини.
5. Сформулюйте умову нерозривності потоку.
6. Що є умовою плавання тіл?

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №5

Основні підходи до розв'язування задач із тем «Рівновага тіл» та «Елементи механіки рідин і газів» розглянемо на прикладі задач.

Задача 1. Дві людини однакового зросту тримають за кінці в горизонтальному положенні трубу завдовжки 2 м і масою 10 кг. На відстані 0,5 м від першої людини до труби підвішений вантаж масою 100 кг. Визначити сили, з якими труба тисне на плечі кожної людини (мал. 1).

Дано:

$$l = 2 \text{ м}$$

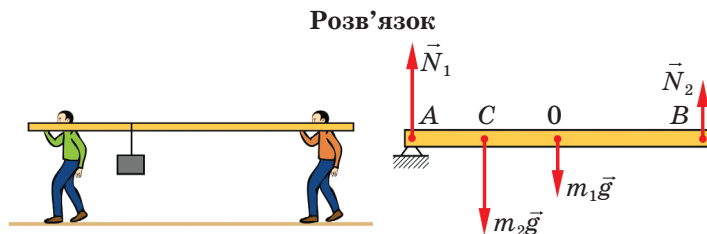
$$m_1 = 10 \text{ кг}$$

$$d = 0,5 \text{ м}$$

$$m_2 = 100 \text{ кг}$$

$$F_1 \text{ — ?}$$

$$F_2 \text{ — ?}$$



Мал 1. До задачі 1

Покажемо на малюнку сили, що діють на трубу, і запишемо умови її рівноваги, вибравши координатну вісь, яка проходить через точку A :

$$N_1 + N_2 - m_1g - m_2g = 0.$$

$$m_2g \cdot AC + m_1g \cdot AO - N_2 \cdot AB = 0.$$

Звідси знайдемо: $N_2 = \frac{m_2gAC + m_1gAO}{AB}$; $N_2 = 300$ Н.

$$N_1 = (m_1 + m_2)g - N_2; N_1 = 800$$
 Н.

Для перевірки відповіді можна скористатися правилом моментів відносно точки B :

$$N_1 \cdot AB - m_2g \cdot CB - m_1g \cdot OB = 0.$$

$$N_1 = \frac{m_2gCB + m_1gOB}{AB}; N_1 = 800$$
 Н.

Згідно з третім законом Ньютона труба тисне на плечі з силами \vec{F}_1 і \vec{F}_2 , рівними за модулем, але протилежними за напрямом силам \vec{N}_1 і \vec{N}_2 .

$$\vec{F}_1 = -\vec{N}_1, \vec{F}_2 = -\vec{N}_2. \text{ Отже, } F_1 = 800 \text{ Н, } F_2 = 300 \text{ Н.}$$

Відповідь: $F_1 = 800$ Н, $F_2 = 300$ Н.

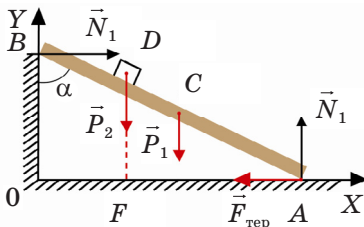
Задача 2. На яку висоту може піднятися людина масою 60 кг по триметровій драбині, якщо драбина стоїть під кутом 30° до ідеально рівної стіни. Маса драбини 20 кг, коефіцієнт тертя ковзання між підлогою і драбиною 0,5.

Дано:
 $m_{\text{л}} = 60$ кг
 $\alpha = 30^\circ$
 $m_{\text{д}} = 60$ кг
 $\mu = 0,5$
 $AB = l = 3$ м
 $AC = 1,5$ м
 $ED = ?$

Розв'язок

Зобразимо на рисунку сили, що діють на драбину (мал. 2).

Розглядатимемо драбину як однорідний стержень, сила тяжіння якого дорівнює вазі \vec{P}_1 прикладена до його середини.



Мал 2. До задачі 2

У точках A і B діють сили реакції опори \vec{N}_1 і \vec{N}_2 , перпендикулярні до поверхні відповідно в точках A і B . У точці A на драбину діє сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$, що запобігає її ковзанню вправо, а в точці D стоїть людина і діє на неї з силою \vec{F}_2 .

Запишемо умову рівноваги в проєкціях на координатні осі.

На вісь OX : $N_{1x} + N_{2x} + F_{\text{тер}x} + P_{1x} + P_{2x} = 0$; $N_2 - \mu \cdot N_1 = 0$.

На вісь OY : $N_{1y} + N_{2y} + F_{\text{тер}y} + P_{1y} + P_{2y} = 0$; $N_1 - P_1 - P_2 = 0$.

Складаємо рівняння моментів сил відносно точки A . Моменти сил \vec{N}_1 і $\vec{F}_{\text{тер}}$ дорівнюють нулю. Моменти сил \vec{P}_1 і \vec{P}_2 від'ємні, а їхні значення, відповідно, дорівнюють $P_1 AC \sin \alpha$ і $P_2 AD \sin \alpha$. Моменти сили \vec{N}_2 додатний і дорівнює $N_2 AB \cos \alpha$.

За правилом моментів $N_2 AB \cos \alpha - P_1 AC \sin \alpha - P_2 AD \sin \alpha = 0$.

Маємо систему рівнянь з трьома невідомими:

$$N_2 - \mu \cdot N_1 = 0;$$

$$N_1 - P_1 - P_2 = 0.$$

$$N_2 AB \cos \alpha - P_1 AC \sin \alpha - P_2 AD \sin \alpha = 0$$

Розв'язуємо систему рівнянь відносно AD :

$$AD = \frac{\mu(P_1 + P_2) \cdot AB \cos \alpha - P_1 AC \sin \alpha}{P_2 \sin \alpha}.$$

Шукану величину визначаємо за формулою: $ED = AD \cos \alpha$.

$$ED = \frac{\mu(P_1 + P_2) \cdot AB \cos \alpha - P_1 AC \sin \alpha}{P_2 \sin \alpha} \cos \alpha.$$

Підставивши значення фізичних величин отримаємо 2,56 м.

Відповідь: 2,56 м.

Задача 3. Два однорідні кубики вагою $P_1 = 3$ Н і $P_2 = 12$ Н з довжинами ребер відповідно $l_1 = 0,08$ м і $l_2 = 0,12$ м з'єднані за допомогою однорідного стержня, що має довжину $d = 0,1$ м і вагу $P_3 = 6$ Н. Кінці стержня прикріплені до середини граней кубиків, а центри кубиків лежать на продовженні осі стержня. Знайти положення центра тяжіння системи.

Дано:

$$P_1 = 3 \text{ Н}$$

$$P_2 = 12 \text{ Н}$$

$$l_1 = 0,08 \text{ м}$$

$$l_2 = 0,12 \text{ м}$$

$$d = 0,1 \text{ м}$$

$$P_3 = 6 \text{ Н.}$$

$$x = ?$$

Розв'язок

Нехай відстань від центра тяжіння системи C до центра тяжіння стержня — x .

Сума моментів сил тяжіння відносно осі, що проходить через точку C , повинна дорівнювати нулю. Запишемо рівняння:

$$P_1 \left(\frac{l_1}{2} + \frac{d}{2} + x \right) + P_3 x - P_2 \left(\frac{l_2}{2} + \frac{d}{2} - x \right) = 0.$$

Зробивши необхідні перетворення, одержимо:

$$x = \frac{P_2(l_2 + d) - P_1(l_1 + d)}{2(P_1 + P_2 + P_3)} = 0,05 \text{ м.}$$

Відповідь: центр тяжіння системи лежить на відстані 0,05 м від центра стержня, тобто в точці прикріплення другого кубика.

Задача 4. Визначити положення центра тяжіння однорідної круглої пластинки радіусом $R = 0,5$ м, в якій вирізано квадратний отвір зі стороною $a = \frac{R}{2}$ так, як показано на малюнку до цієї задачі.

Дано:

$$R = 0,5 \text{ м}$$

$$a = \frac{R}{2}$$

$x = ?$

Розв'язок

Для центра тяжіння фігури має виконуватися правило моментів:

$$\Sigma M = 0.$$

У цьому прикладі, якщо повернути вирізану частину на своє місце, то вагу всієї пластинки P можна розглядати як суму двох паралельних сил — ваги вирізаної частини P_1 і ваги новоутвореної фігури P_2 , точка прикладання якої змістилася ліворуч від точки O на відстань x : $P = P_1 + P_2$

Рівняння моментів сил відносно точки O матиме вигляд: $P_2x - P_1l = 0$ або $P_2x = P_1l$.

Але $P_2 = P - P_1$. Тоді: $(P - P_1)x = P_1l$.

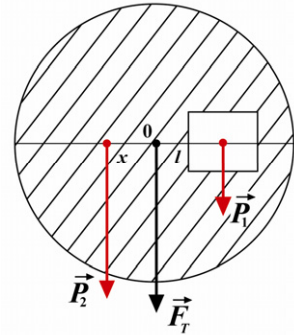
$$\text{З цього рівняння знаходимо: } x = \frac{P_1 \cdot l}{P - P_1}.$$

Оскільки $P = mg = \rho Shg$; $P_1 = \rho S_1hg$, де ρ — густина матеріалу пластинки; S — площа пластинки; h — її висота, сила тяжіння однорідного диска пропорційна його площі,

означає $x = \frac{S_1l}{S - S_1}$, де S_1 — площа вирізаної частини. $S_1 = a^2$; $S = \pi R^2$; $l = R/2$.

Підставивши ці значення у попередню формулу, одержуємо: $x \approx 0,02 \text{ м}$.

Відповідь: $x \approx 0,02 \text{ м}$.



Мал. до задачі 4

Розглянемо приклади задач із застосуванням законів для механіки рідин і газів.

Задача 5. Якщо піднятися на гору, то атмосферний тиск там дорівнює 680 мм рт. ст. На рівні океану атмосферний тиск дорівнює 760 мм рт. ст. Визначте висоту гори.

Дано:

$$p_{\text{ат.1}} = 680 \text{ мм рт. ст.}$$

$$p_{\text{ат.2}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$\Delta p_0 = 1 \text{ мм рт. ст.}$$

$$\Delta h = 11 \text{ м}$$

$h = ?$

Розв'язок

Різниця атмосферних тисків на рівні океану і на Вершині гори $\Delta p = p_{\text{ат.2}} - p_{\text{ат.1}} = 80 \text{ мм рт. ст.}$ відповідає зміні висоти, яка відповідає висоті гори.

Зміна тиску на 1 мм рт. ст. відповідає висоті $\Delta h_0 = 11 \text{ м}$.

Склавши пропорцію, отримаємо:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{h}{\Delta h_0}; \quad h = \frac{\Delta h_0 \Delta p}{\Delta p_0}; \quad h = \frac{11 \cdot 80}{1} = 880 \text{ (м)}.$$

Відповідь: висота гори 880 м.

Задачі для самостійного розв'язання

- 1 (с). Довгий стержень легше утримувати в горизонтальному положенні за середину, ніж за край. Чому?
- 2 (с). Чому зігнутою в лікті рукою можна підняти більший вантаж, ніж витягнутою?
- 3 (с). Поясніть, чому конторські ножиці для нарізання паперу мають довгі леза і майже такої самої довжини ручки, тоді як ножиці для листового металу мають ручки, значно довші порівняно з лезами.
- 4 (с). Під час пострілу в круто зварене яйце в ньому утворюється отвір. Чому ж під час пострілу в сире яйце воно розлітається у всіх напрямках?
- 5 (д). У гідравлічному підйомнику, у якого площа малого поршня 3 см^2 , а площа великого — $0,18 \text{ м}^2$, утворюється тиск 100 Н/см^2 . Вантаж якої ваги, враховуючи і вагу поршня, можна підняти таким підйомником? Яка сила діє на малий поршень?
- 6 (д). Чи пройде по льоду трактор, маса якого 12 т , а розміри гусениці $2,48 \times 0,5 \text{ м}$, якщо лід витримує тиск 60 кПа ?
- 7 (д). Визначте підймальну силу поплавка батискафа у морській воді, густиною 1030 кг/м^3 , якщо його об'єм становить 100 м^3 . Маса порожнього поплавка 15 т , і в ньому міститься 70 м^3 бензину густиною 650 кг/м^3 .
- 8 (д). У сполучених посудинах установився однаковий рівень води. Над водою в лівому коліні є стовпчик гасу заввишки 12 см , у правому стовпчик бензину. Визначте висоту бензину. Густина гасу 800 кг/м^3 , бензину — 700 кг/м^3 .
- 9 (д). До кінця стержня масою 10 кг і завдовжки 40 см підвішені вантажі $P_1 = 400 \text{ Н}$ і $P_2 = 100 \text{ Н}$. У якому місці потрібно підперти стержень, щоб він перебував в рівновазі?
- 10 (д). Канатоходець масою 75 кг стоїть посередині канату завдовжки $8,6 \text{ м}$, натягнутого між двома опорами, що розміщені на відстані 8 м одна від одної. Знайдіть натяг канату.
- 11 (в). Нижній кінець драбини знаходиться на підлозі, а верхній спирається на гладеньку вертикальну стінку. Коефіцієнт тертя між підлогою і драбиною дорівнює μ . Визначте, при якому значенні кута α між драбиною і стіною драбина перебуватиме у рівновазі.
- 12 (в). Сім'я гойдається на гойдалці. Маса батька 70 кг , маса матері — 50 кг . Вони знаходяться на протилежних кінцях 6-метрової дошки. У якому місці їм треба посадити дитину масою 25 кг , щоб дошка зрівноважилась?
- 13 (в). Рибальська вудка має довжину $3,6 \text{ м}$ і масу 1 кг . Центр тяжіння вудки знаходиться на віддалі $1,2 \text{ м}$ від товстого кінця. Рибалка підвісив рибу на товстому кінці й зрівноважив вудку, підперши її на віддалі 50 см від товстого кінця. Яка вага риби?
- 14 (в). До коркового поплавка масою $1,2 \text{ г}$ прив'язали ниткою тіло зі сталі, маса якого $11,7 \text{ г}$. Під час повного занурення цих зв'язаних тіл динамометр показав $0,064 \text{ Н}$. Визначте густину корка. Густина сталі 7800 кг/м^3 .
- 15 (в). Шматок сплаву міді і срібла має вагу $2,94 \text{ Н}$. Під час занурення його у воду динамометр показує $2,646 \text{ Н}$. Визначте масу срібла і міді в сплаві. Густина срібла $10\,500 \text{ кг/м}^3$, міді — 8900 кг/м^3 .

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№4)

- 1 (п).** Вкажіть прилад для вимірювання атмосферного тиску:
А динамометр
Б тонометр
В барометр
Г манометр
- 2 (п).** Яка з наведених формул є записом закону Архімеда?

А	Б	В	Г
$F = -k\Delta l$	$p = \rho gh$	$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$	$F = \rho_p g V$
- 3 (п).** Установіть відповідність «фізична величина — позначення фізичної величини».
- | | |
|----------------------|-----------------|
| 1 Тиск | А p |
| 2 Густина | Б V |
| 3 Момент сили | В ρ |
| 4 Об'єм | Г P |
| | Д M |
- 4 (с).** Точку через яку проходить рівнодійна всіх сил тяжіння, називають:
А Геометричним центром.
Б Точкою опори.
В Точкою підвісу.
Г Центром тяжіння.
- 5 (с).** На Землі хлопчик може вільно підняти тіло, вага якого 100 Н. Яка буде вага цього тіла у воді, якщо його об'єм 1 дм³?
- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| А | Б | В | Г |
| 99 Н | 110 Н | 90 Н | 100 Н |
- 6 (д).** Двері розміром 2×1 м і масою 32 кг підвішені на двох завісах, розміщених на відстані 20 см кожна від верхнього і нижнього країв дверей. З якою силою двері тягнуть верхню завісу в горизонтальному напрямі?
- 7 (д).** Вода у водонапірну башту, висота якої 20 м, подається поршневим насосом з площею поршня 20 см². З якою силою діє електродвигун на поршень, щоб підняти воду у водонапірну башту?
- 8 (д).** Крижина плаває у воді. Об'єм її надводної частини становить 20 м³. Визначте об'єм підводної частини. Густина льоду 900 кг/м³.
- 9 (в).** Дві кулі масами 3 кг і 5 кг скріплені стержнем, маса якого 2 кг. Визначте положення спільного центра мас, якщо радіус першої кулі 5 см, другої 7 см, довжина стержня 30 см.
- 10 (в).** На середину телеграфного дроту, натягнутого між двома опорами, відстань між якими 6 м, сів птах масою 2 кг. Внаслідок цього провід провис на 0,3 м. Визначте силу пружності дроту, масою дроту можна знехтувати.

§ 17. Закон збереження імпульсу

- ▶ Імпульс тіла. Взаємодія тіл у замкнутій системі
- ▶ Закон збереження імпульсу та його застосування

ІМПУЛЬС ТІЛА. У курсі фізики 9-го класу ви ознайомилися з імпульсом тіла та імпульсом сили.

Імпульс тіла є векторною фізичною величиною і визначається за формулою $\vec{p} = m\vec{v}$.

Імпульс сили є векторною фізичною величиною і визначається за формулою $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$.

Ви вже знаєте, що будь-які фізичні явища є причиною і наслідком постійних взаємодій між тілами. У реальних умовах практично неможливо врахувати взаємодію певного тіла з іншими. Одні взаємодії є досить значними, а інші настільки малі, що ними можна знехтувати під час розв'язування конкретної задачі. Наприклад, досліджуючи рух певного тіла в земних умовах, враховують його притягання до Землі, і не беруть до уваги гравітаційну взаємодію з іншими тілами.

Тому для кожного конкретного випадку спеціально визначають тіла, що утворюють окрему, тобто замкнуту або ізольовану, систему.

Замкнутою або ізольованою називають систему, в якій тіла, що їй належать, взаємодіють лише між собою і не взаємодіють з іншими тілами, які до цієї системи не належать, або такі взаємодії є незначними і їх не враховують.

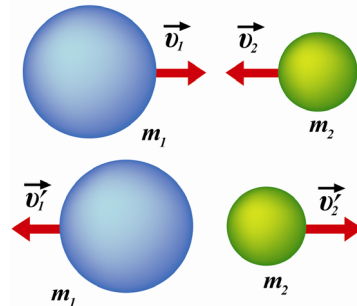
Сили, з якими тіла взаємодіють усередині замкнutoї системи, називають внутрішніми.

Важливість замкнutoх (ізольованих) систем у механіці визначається тим, що саме в них залишаються незмінними фізичні величини, зокрема, такі характеристики механічного руху, як імпульс та енергія.

Прикладом взаємодії тіл у замкнutoї системі є пружний удар. Під ударом розуміють таку взаємодію тіл, яка здійснюється протягом короткого проміжку часу, тобто майже миттєво. Як правило, під час удару взаємодія здійснюється силами пружності, які виникають у тілах внаслідок їх деформації під час стискання.

Якщо після удару розміри і форма тіл, що взаємодіють, повністю відновлюються, то такий удар називають абсолютно пружним.

Кульки масами m_1 та m_2 , які рухаються із швидкостями \vec{v}_1 та \vec{v}_2 назустріч одна одній (мал. 17.1), пруж-



Мал. 17.1. У процесі пружної взаємодії кульки, що рухаються назустріч одна одній, змінюють напрямок власного руху

но взаємодіють впродовж деякого часу t , внаслідок чого напрямок їхнього руху змінюється.

У природі спостерігаються також взаємодії, які називаються непружними. У таких випадках тіла, що взаємодіють, утворюють нове тіло, маса якого дорівнює сумі мас складових.

ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ. Щоб експериментально підтвердити властивість імпульсу зберігатися, розглянемо пружну взаємодію двох кульок (мал. 17.2).

За третім законом Ньютона сили, що діють на кульки, рівні за модулем і протилежні за напрямком: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Оскільки взаємодія здійснюється за певний проміжок часу t (однаковий для обох тіл), то імпульси сил будуть рівними: $\vec{F}_1 t = -\vec{F}_2 t$.

Підставивши значення імпульсу сили у вираз для імпульсу тіла, одержимо:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 &= -(m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2); \\ m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 &= m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}'_2; \\ m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}_2 &= m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}'_2. \end{aligned}$$

Отже, якщо взаємодія тіл здійснюється в замкнутій системі, то сума їх імпульсів до взаємодії ($m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$) дорівнює сумі їхніх імпульсів після взаємодії ($m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$).

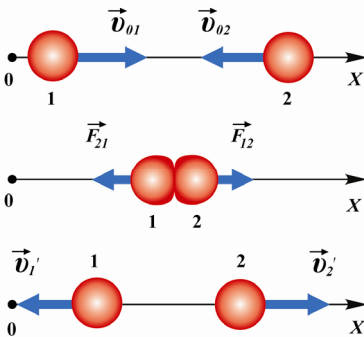
Повний імпульс замкнутої системи тіл (сума імпульсів усіх тіл, що взаємодіють у системі) є величиною постійною:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const}.$$

Закон збереження імпульсу покладений в основу багатьох фізичних явищ та відіграє важливу роль у живій природі, науці і техніці.

Зауважимо, що цей закон можна застосовувати також для неізолюваних систем за умови, що сума імпульсів зовнішніх сил дорівнює нулю.

Хоча ми отримали математичний вираз закону збереження імпульсу, виходячи із законів Ньютона, він не є їх наслідком, а має універсальний, фундаментальний характер. Тобто закон збереження імпульсу виконується для тіл як макро-, так і мікросвіттів: які б зміни не відбувалися в замкнутій системі (взаємодія планет, елементарних частинок тощо), імпульс системи тіл залишається незмінним. Отже, саме на основі закону збереження імпульсу можна проаналізувати рух тіл замкнутої системи навіть тоді, коли внутрішні сили невідомі, тобто вивчати окремі



Мал. 17.2. Під час пружної взаємодії двох кульок виконується закон збереження імпульсу

взаємодії, без використання основного закону динаміки (другого закону Ньютона).

Проявом закону збереження імпульсу в природі та техніці є реактивний рух.

Реактивним називають рух, який здійснюється внаслідок відокремлення із певною швидкістю частини маси тіла.

Реактивний рух — досить поширений у природі. Переміщення в просторі окремих живих організмів тваринного та рослинного світу здійснюється на основі закону збереження імпульсу. Деякі мешканці морів та океанів у процесі руху створюють реактивні струмені. Так, кальмари й каракатиці заповнюють водою порожнисті частини тіла, а потім за допомогою спеціальних м'язів виштовхують її назовні. Так їм вдається переміщуватися з доволі великою швидкістю.

Деякі рослини (наприклад, такі як «шалений огірок») після досягання випускають назовні власне насіння. Воно рухається в один бік, а сама рослина — в інший, за законами реактивного руху (мал. 17.3).

Досліди з вивчення реактивного руху ви можете виконати у фізичній лабораторії. Одним із пристроїв, робота якого ілюструє застосування реактивного руху, є Сегнерове колесо.

Конічна посудина з водою може вільно обертатися навколо нерухомої осі, а вода витікає з неї через дві загнуті трубки. Якщо трубки закриті, то сила тяжіння, що діє на установку, компенсується силами Архімеда та реакції опори. Коли вода вільно витікає через трубки, колесо починає обертатися. Кожна з трубок рухатиметься у протилежному напрямку внаслідок відокремлення (витоку) води (мал. 17.4, а).

Прикладом реактивного руху є рух візка з повітряною кулькою, з якої через трубку з отвором витікає повітря (мал. 17.4, б).

Оскільки реактивний рух не потребує дії додаткових тіл, окрім тих, що утворюють систему (тіло), то він широко застосовується в техніці. На відміну від інших видів руху, умовою здійснення яких є вплив інших тіл



а)



б)

Мал. 17.3.

Реактивний рух у природі:
а) кальмари та молюски переміщуються за законами реактивного руху;
б) «шалений огірок»



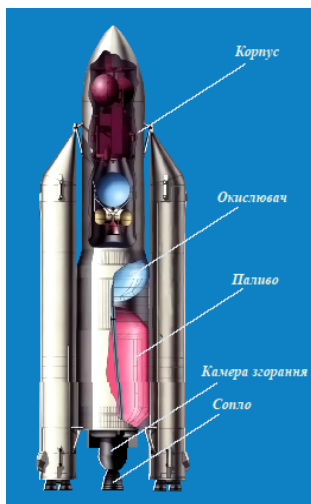
а)



б)

Мал. 17.4.

Приклади реактивного руху:
а) Сегнерове колесо;
б) реактивний рух візка з кулькою



Мал. 15.5.

Схема будови ракети

(наприклад, сили тертя під час руху поверхнею Землі та опору повітря під час польоту), реактивний рух може здійснюватися і за відсутності впливу інших тіл, зокрема, в навколосемному, космічному просторі або вакуумі.

Ідею реактивного руху реалізовано в ракетах — спеціальних пристроях, призначених для польотів за межі нашої планети та дослідження близького і далекого космосу. Загалом ракета складається із двох основних тіл, що утворюють замкнуту систему, в якій виконується закон збереження імпульсу — робоча частина та пальне.

До робочої частини належать: оболонка, реактивний двигун, відсік для обладнання та космонавтів, а основну частину маси ракети становить пальне (мал. 17.5).

Найпоширенішими сучасними реактивними двигунами є двигуни, що працюють на рідкому паливі. Вони мають спеціальну камеру згорання, до якої закачується рідке пальне. За допомогою окиснювачів паливо спалюється, у результаті чого утворюються розжарені гази високої температури. Вони створюють тиск на стінки камери згорання. Задня стінка має спеціальне сопло, через яке розжарений газ витікає назовні. Оскільки сила тиску на передню стінку значно перевищує тиск на задню, створюється реактивна сила тяги, що рухає ракету вперед.

Історія освоєння космічного простору безпосередньо пов'язана з українськими вченими та інженерами. Перші у світі ракети, що були використані для подолання сили земного тяжіння і виведення на



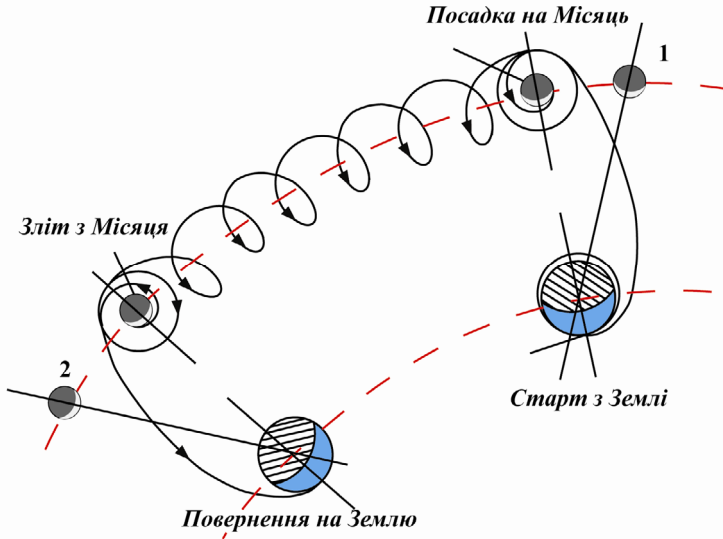
Сергій Павлович Корольов
(1906—1966),
академік, видатний
конструктор космічної
техніки



Валентин Петрович Глушко
(1908—1989),
видатний конструктор
ракетних двигунів



Юрій Васильович Кондратюк (О. Г. Шаргей)
(1897—1942),
український вчений —
дослідник космосу



Мал. 17.6. «Зоряна траса»
Ю. В. Кондратюка (О. Г. Шаргея)

орбіту Землі першого штучного супутника та польоту першого космонавта, розроблялися під керівництвом академіка С. П. Корольова. Одні з перших рідинних реактивних двигунів, які забезпечували надійну роботу космічних апаратів, було розроблено під керівництвом академіка В. П. Глушка.

Схема гравітаційного маневру під час польоту на інші тіла Сонячної системи мал. 17.6. Цю схему було вдало використано американськими астронавтами під час польоту на природний супутник Землі — Місяць.

Нині наша країна є космічною державою, однією з небагатьох, що проєктують і виготовляють ракети-носії для виведення на орбіту штучних супутників, космічних кораблів та станцій. Вітчизняні реактивні носії «Зеніт» щороку здійснюють польоти з наземних та морських космодромів (мал. 17.7).

Основну конструкцію першого ступеня такого носія розроблено конструкторським бюро «Південне» та виготовлено Південним машинобудівним заводом у кооперації з вітчизняними підприємствами «Хартрон-АРКОС» (Харків), «Київприлад» (Київ), «Хартрон-ЮКОМ» (Запоріжжя), «ЧЕЗАРА», «РАПІД» (Чернігів) та ін.

Перспективним напрямом сучасної космонавтики є створення ракет-носіїв багаторазового використання з ме-



Мал. 17.7. Запуск ракет-носія *Antares* в США

тою здійснення пілотованих польотів у найближчій перспективі до Марса та інших небесних тіл. Досягнення цих амбітних цілей пов'язують, зокрема, з успішними запусками надпотужних ракет системи *Falcon Heavy*, здатних виводити на орбіту Землі до 63 тонн корисних вантажів та доставити до Марса близько 26 тонн вантажів, що робить практично можливим політ людини до цієї планети.

Приклади розв'язування задач на застосування закону збереження імпульсу та реактивний рух

Задача 1. Тіло летить горизонтально зі швидкістю 10 м/с. Під час польоту воно розділяється на дві частини, маси яких становлять відповідно 1 та 1,5 кг. Швидкість більшої частини залишається горизонтальною і зростає до 25 м/с. Визначити величину і напрямок швидкості меншої частини.

Дано:

$$v_0 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_1 = 1 \text{ кг}$$

$$m_2 = 1,5 \text{ кг}$$

$$v_2 = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_1 = ?$$

Розв'язок

Коли тіло було цілим, повний імпульс системи становив $(m_1 + m_2)v_0$, після розділення на частини її імпульс становить: $m_1v_1 + m_2v_2$. За законом збереження імпульсу: $(m_1 + m_2)v_0 = m_1v_1 + m_2v_2$. Виберемо додатний напрямок осі в напрямку руху більшої частини. Оскільки напрямок руху меншої частини невідомий, то припустимо, що після поділу вона рухатиметься в тому ж напрямку, що й більша.

Запишемо рівняння з урахуванням проекції векторів швидкості на координатну вісь: $(m_1 + m_2)v_0 = m_1v_1 + m_2v_2$, звідки $v_1 = \frac{(m_1 + m_2)v_0 - m_2v_2}{m_1}$.

$$\text{Обчислюємо: } v_1 = \frac{2,5 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 1,5 \text{ кг} \cdot 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ кг}} = -12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Відповідь: } v_1 = -12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Зверніть увагу! Знак «мінус» вказує на те, що вектор швидкості меншої частини тіла направлений протилежно вибраному напрямку руху.

Задача 2. Під час запуску моделі ракети масою 250 г з неї миттєво витікає 50 г стиснутого повітря зі швидкістю 2 м/с. Знайти швидкість, з якою рухатиметься ракета.

Дано:

$$M = 250 \text{ г} = 0,25 \text{ кг}$$

$$m = 50 \text{ г} = 0,05 \text{ кг}$$

$$v_n = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_p = ?$$

Розв'язок

Запишемо закон збереження імпульсу, вважаючи систему «модель — повітря» замкнутою $Mv_0 = (M - m)v_p + mv_n$. Якщо прийняти початкову швидкість моделі ракети $v_0 = 0$, а вісь Ox спрямувати в напрямку руху ракети, то: $(M - m)v_p = mv_n$.

Отже, $v_p = \frac{mv_p}{M-m}$. Підставивши числові значення величин, отримає-

$$\text{мо: } v_p = \frac{0,05 \text{ кг} \cdot 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,2 \text{ кг}} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь: модель ракети рухається зі швидкістю 0,5 м/с.

! Головне в цьому параграфі

Закон збереження імпульсу виконується в замкнутій системі. Замкнутою або ізольованою називають систему, в якій тіла, що їй належать, взаємодіють лише між собою і не взаємодіють з іншими тілами, що до цієї системи не належать, або такі взаємодії є незначними і їх не враховують.

Якщо сума зовнішніх сил дорівнює нулю, то імпульс системи зберігається; тобто сума імпульсів тіл системи до взаємодії дорівнює сумі їхніх імпульсів після взаємодії:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2, \text{ тобто } \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const}$$

Під час непружного удару тіла, що взаємодіють, утворюють систему, маса якої дорівнює сумі початкових мас тіл.

Реактивний рух є проявом закону збереження імпульсу. Система, що здійснює реактивний рух, не потребує взаємодії з іншими тілами, окрім тих, що їй належать, тому вона може переміщатись у навколосемному просторі.

? Запитання для самоперевірки

1. Яку систему тіл називають замкнутою?
2. Що називають пружним ударом?
3. Які сили називають внутрішніми?
4. Сформулюйте закон збереження імпульсу. За яких умов він виконується?
5. Яка важлива особливість реактивного руху забезпечує його широке використання в сучасній техніці?
6. Які основні складові сучасної ракети?
7. Які характеристики ракети визначають її максимальну швидкість?
8. Як створюється реактивна сила?
9. Як вирішують питання збільшення співвідношення корисної маси і маси оболонки ракети?

ГОТУЄМОСЯ ДО ВИКОНАННЯ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЕКТУ

1. Розкрийте внесок вітчизняних учених і конструкторів у справу освоєння космосу.
2. Запропонуйте власну схему космічної ракети майбутнього.

Вправа до § 17

- 1 (с). Рибалка, маса якого 80 кг стрибає в нерухомий човен зі швидкістю 3 м/с. З якою швидкістю рухатиметься човен, маса якого 160 кг?
- 2 (с). Потяг, маса якого 2000 т, рухаючись прямолінійно, збільшив швидкість від 36 до 72 км/год. Визначте зміну його імпульсу. Розв'яжіть задачу аналітичним і графічним способами.

- 3 (д).** Два непружні тіла масою 2 і 6 кг рухаються назустріч одне одному із швидкістю 2 м/с кожне. З якою швидкістю і в який бік рухатимуться тіла після удару?
- 4 (д).** Рух матеріальної точки описується рівнянням $x = 5 - 8t + 4t^2$. Приймаючи масу точки за 2 кг, визначте її імпульс через 2 с і через 4 с після початку відліку часу.
- 5 (в).** Снаряд, випущений вертикально, досягнувши максимальної висоти, розірвався на три осколки. Два з них розлетілися під прямим кутом один до одного, причому швидкість осколка масою 9 кг становить 60 м/с, а іншого, масою 18 кг — 40 м/с. Третій осколок відлетів зі швидкістю 200 м/с. Визначте графічно напрямок руху третього осколка. Яка його маса?

§18. Механічна робота. Потужність

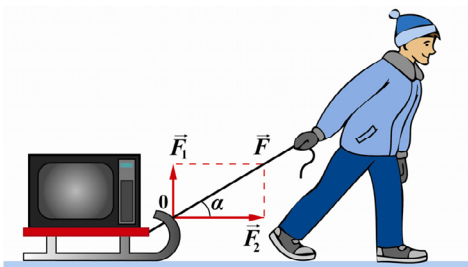
- ▶ *Робота сили*
- ▶ *Потужність*

РОБОТА СИЛИ. На практиці зручно описувати зміну механічного стану системи фізичною величиною, яку називають роботою. Роботу виконують найрізноманітніші машини і механізми, а також людина за допомогою власних м'язів. Оскільки взаємодія тіл характеризується силою, то рух одного тіла внаслідок взаємодії з іншими викликаний дією деякої сили. Говорять, що тіла виконують роботу. Отже, якщо до тіла прикладено певну силу і воно під її дією здійснює переміщення, то така сила виконує механічну роботу (рис. 18.1).

Механічна робота — це фізична величина, що кількісно характеризує зміну стану тіла під дією сили.

Робота сили дорівнює добутку модулів сили F , переміщення s і косинуса кута α між ними $A = Fscos\alpha$.

За цією формулою обчислюють роботу постійної сили, під дією якої тіло переміщується прямолінійно.



Мал. 18.1. Робота сили тяги

Робота є величиною скалярною. За одиницю роботи приймають джоуль, що в СІ визначається як робота сили в 1 Н під час переміщення точки її прикладання на 1 м:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Знак роботи визначається знаком косинуса кута між силою і переміщенням. Робота $A > 0$, якщо $\alpha < 90^\circ$. Якщо $\alpha > 90^\circ$ — робота від'ємна. Якщо $\alpha = 90^\circ$ (сила перпендикулярна переміщенню), то робота не виконується.

Фізичний зміст додатної роботи полягає в тому, що тіло переміщується в напрямку дії сили. Робота від'ємна, якщо переміщення тіла протилежне до напрямку дії сили.

Додатною є робота сили тяги, оскільки вона напрямлена вздовж переміщення.

Додатна робота виконується силою натягу нитки під час піднімання вантажу. Від'ємну роботу, як правило, виконують сили тертя, що напрямлені протилежно руху. Водночас робота сил тертя може бути додатною (наприклад, сила тертя спокою, що прикладена до людини на ескалаторі, спрямована у бік його руху).

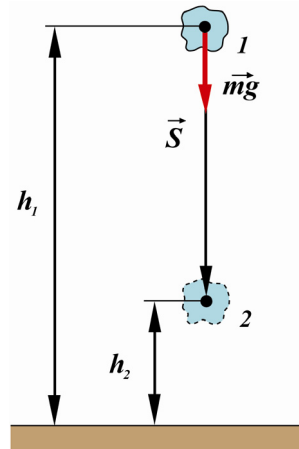
Не виконує роботу сила тяжіння під час переміщення тіла горизонтальною площиною. Тобто робота сили тяжіння не залежить від форми траєкторії, якою рухається тіло.

Під час прямолінійного руху робота сили тяжіння залежить від положення тіла у початковий і кінцевий моменти часу:

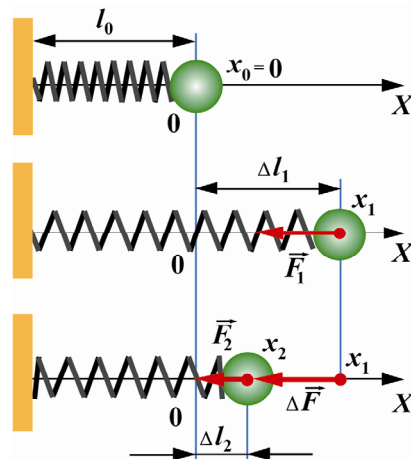
$$\begin{aligned} A &= F \Delta h \cos 0^\circ = \\ &= mg(h_1 - h_2) \cos 0^\circ = mgh_1 - mgh_2 \end{aligned}$$

Якщо тіло повернеться з положення 2 в положення 1, тобто рухатиметься замкнутою траєкторією, то робота сили тяжіння дорівнюватиме нулю (мал. 18.2).

Сили, робота яких не залежить від форми траєкторії, а визначається лише початковим і кінцевим положенням тіла під час його переміщення замкнутою траєкторією, що дорівнює нулю, називаються консервативними. Консервативною є і сила пружності. Робота з переміщення кульки на пруж-



Мал. 18.2. Робота сили тяжіння замкнутою траєкторією



Мал. 18.3. Робота сили пружності

жині (мал. 18.3) виконується силою, яка змінюється під час деформації пружини.

Тож можна використати середнє значення сили: $F = \frac{F_1 + F_2}{2}$. Тому $A = \frac{F_1 + F_2}{2}(\Delta l_1 - \Delta l_2)$, оскільки за законом Гука, $F = -k\Delta l$, а напрямок переміщення і осі руху однакові, то $F_1 = k\Delta l_1$; $F_2 = k\Delta l_2$. Відповідно: $F = \frac{k\Delta l_1 + k\Delta l_2}{2}$; $A = F\Delta l = \frac{k(\Delta l_1 + \Delta l_2)}{2}(\Delta l_1 - \Delta l_2)$; $A = \frac{k\Delta l_1^2}{2} - \frac{k\Delta l_2^2}{2} = \frac{1}{2}k(\Delta l_1^2 - \Delta l_2^2)$.

Якщо на тіло діють кілька сил, то сума їхніх проекцій на переміщення є проекцією результуючої сили: $F_s = F_{1s} + F_{2s} + F_{3s} + \dots$, а робота $A = F_{1s}|\vec{s}| + F_{2s}|\vec{s}| + F_{3s}|\vec{s}| + \dots = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$, де A — повна робота (сума робіт усіх сил) дорівнює роботі результуючої сили.

Якщо кулька повернеться в положення x_1 , тобто траєкторія буде замкнутою, сила пружності, як і сила тяжіння, не виконує роботу, тобто є консервативною.

ПОТУЖНІСТЬ. Робота характеризує дію сили і залежить від її величини, напрямків сили та переміщення, а не залежить від часу. Тобто величина механічної роботи не дає можливості визначити, впродовж якого часу вона виконувалася. Оскільки на практиці часто важливо знати час докладання сили, відповідно, виконання роботи, то використовують фізичну величину, яка характеризує швидкість її виконання.

Потужність — скалярна фізична величина, що визначає швидкість виконання роботи й чисельно дорівнює роботі за одиницю часу:

$$N = \frac{A}{\Delta t}.$$

Враховуючи, що $A = F s \cos \alpha$; $N = \frac{F s}{\Delta t} \cos \alpha = F v \cos \alpha$.

Якщо кут між векторами сили і швидкості більший за 90° , то потужність буде від'ємною. Тобто тіло споживатиме потужність.

Одиницею вимірювання потужності є ват (Вт). Тіло має потужність 1 Вт, якщо виконує роботу в 1 Дж протягом 1 с.

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^3} \right].$$

Дотепер використовують таку одиницю (позасистемну) потужності, як кінська сила (к.с.)

$$1 \text{ к.с.} \approx 735 \text{ Вт}.$$

Для вимірювання потужності великих механізмів використовують кіловати та мегавати:

$$1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт} (10^3 \text{ Вт});$$

$$1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт} (10^6 \text{ Вт}).$$

! Головне в цьому параграфі

Механічна робота є кількісною мірою дії сили на тіло, що переміщується.

Робота сили дорівнює добутку модулів сили та переміщення і косинуса кута між ними: $A = Fscos\alpha$.

За одиницю роботи приймають джоуль: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Робота сил земного тяжіння та пружності замкнутою траєкторією дорівнює 0.

Потужність характеризує швидкість виконання роботи: $N = \frac{A}{\Delta t}$.

Якщо кут між векторами сили і швидкості більший за 90° , то потужність буде від'ємною. Тобто, тіло споживатиме потужність.

Одиницею вимірювання потужності є ват (Вт). Тіло має потужність 1 Вт, якщо воно виконує роботу в 1 Дж впродовж 1 с.

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^3}.$$

? Запитання для самоперевірки

1. Яку роботу називають механічною?
2. Коли про силу можна сказати, що вона виконує роботу?
3. Наведіть приклади, коли одні й ті самі сили виконують різні за знаком роботи.
4. Чи залежить робота від вибору системи відліку?
5. Що називається потужністю?
6. Чи залежить потужність від напрямку дії сили?
7. Чи залежить виконана робота від маси тіла?
8. Автомобіль рухається рівною дорогою. Чи здійснює роботу сила тяжіння, що діє на автомобіль?

Вправа до § 18

- 1 (д). Коли тиснути на стіл рукою під кутом 30° , робота не виконується. На що ж витрачається зусилля?
- 2 (д). Тіло піднімається похилою площиною на висоту h . Чи відрізняється виконана робота, від тієї, яку потрібно було б виконати тілу, піднімаючись вертикально?
- 3 (д). Сила земного тяжіння виконує роботу, коли тіло:
 - а) рухається вертикально вгору;
 - б) рухається вертикально вниз;
 - в) висить на пружині.

§ 19. Закон збереження механічної енергії.

Застосування законів збереження в механіці

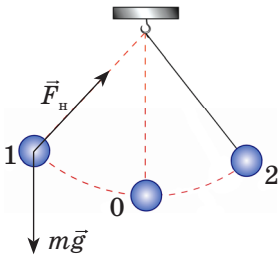
- ▶ Закон збереження і перетворення повної механічної енергії
- ▶ Застосування законів збереження в механіці

ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ І ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОВНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. У механічних системах постійно відбуваються взаємодії між тілами, що до них належать. Змінюються швидкість руху тіл та їх взаємне розташування і, відповідно кінетична та потенціальна енергія системи. Водночас повна механічна енергія замкнутої системи залишається незмінною.

Повною механічною енергією системи називають суму потенціальної та кінетичної енергій:

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}.$$

Розглянемо перетворення механічної енергії в системі, в якій діють консервативні сили (наприклад, сили тяжіння і пружності) (мал. 19.1).



Мал. 19.1. Перетворення механічної енергії

У замкнутій системі «кулька — Земля» на кульку діє сила земного тяжіння $m\vec{g}$ та пружна сила натягу нитки \vec{T} . Вони зрівноважуються, і кулька перебуває у стані спокою. Якщо в цій системі відвести кульку в положення 1, то робота внутрішніх сил буде від'ємною — робота виконується над цією системою. Якщо за нульовий рівень потенціальної енергії прийняти положення 0 ($h_0 = 0$), то після відведення кульки на висоту h (положення 1) її потенціальна енергія дорівнюватиме $E_{\text{п}} = mgh$. Тоді рівновага системи порушиться. Під дією повертаючої сили \vec{F} кулька рухатиметься до положення рівноваги. За другим законом Ньютона, сила, що діє на кульку, визначатиметься як $\vec{F} = m\vec{a}$, де \vec{F} — результуюча сил тяжіння та натягу нитки. Ця сила виконуватиме додатну роботу, і кулька набуватиме деякого прискорення. Відповідно, змінюватиметься і її швидкість. Від положення 1, де швидкість дорівнювала 0, до положення 0, де швидкість — максимальна, та положення 2, де кулька зупиниться, і $\vec{v} = 0$. Тому під час руху із положення 1 до положення 0 потенціальна енергія кульки зменшуватиметься, оскільки зменшуватиметься її висота відносно нульового рівня. Кінетична ж — навпаки, зростатиме, оскільки збільшуватиметься швидкість. У положенні 0 кулька матиме максимальну кінетичну енергію $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$, а її потенціальна енергія дорівнюватиме 0.

Рухаючись від положення 0 до положення 2, зменшуватиметься кінетична енергія кульки і зростатиме потенціальна, яка у положенні 2 буде максимальною і дорівнюватиме $E_{\text{п}} = mgh$. Кінетична енергія при цьому: $E_{\text{к}} = 0$. Отже, під час руху кулька має енергію $E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}$.

Очевидно, що в замкнутій системі тіл додатна робота внутрішніх сил збільшує кінетичну енергію і зменшує потенціальну.

Збільшення кінетичної енергії системи дорівнює зменшенню її потенціальної енергії, а повна механічна енергія залишається незмінною.

Якщо в замкнутій системі діють консервативні сили, то повна механічна енергія системи є величиною незмінною. Можливе лише взаємне перетворення потенціальної та кінетичної енергій системи.

$$E_{\text{м}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}.$$

ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ. Закони збереження імпульсу та повної механічної енергії є фундаментальними законами природи. Вони дають змогу розглядати та аналізувати загальні властивості руху без розв'язування кінематичних рівнянь і врахування інформації про особливості перебігу процесів у ізольованій системі.

Закони збереження встановлено дослідним шляхом як узагальнення величезної кількості експериментальних фактів. Під час вивчення механічних явищ важливу роль відіграють закони збереження енергії, імпульсу та моменту імпульсу (який вивчається в курсі фізики профільного рівня).

Використання законів збереження дає можливість суттєво спростити процес розв'язування широкого кола фізичних задач, які можна умовно поділити на три групи: задачі на закон збереження імпульсу, закон збереження енергії та комбіновані.

Розв'язуючи ці задачі, передусім з'ясовують, чи є певна система тіл ізольованою. До замкнутих систем належать гармата й снаряд, оболонка ракети й паливо в ній, Сонце і планети, Земля та її супутники тощо.

У законі збереження імпульсу поєднуються початкове й кінцеве значення імпульсів замкнутої системи і не враховується вплив внутрішніх сил. Цей закон застосовують до розв'язування задач на розрив тіла на частини або з'єднання кількох тіл в одне; задач на удар і на рух одних тіл поверхнею інших.

Іноді може з'ясуватися, що сума зовнішніх сил, що діють на тіло, не дорівнює нулю, але існує такий окремий напрямок, для якого сума проєкцій усіх зовнішніх сил дорівнює нулю. Тоді проєкція імпульсу системи буде величиною постійною.

Оскільки імпульс та енергія тіла залежать від вибору системи відліку, складаючи рівняння, що виражають закон збереження імпульсу й енергії, необхідно розглядати рух тіл в одній і тій же інерціальній системі відліку. За таку систему часто обирають систему відліку, пов'язану із Землею. Іноді зручно вибирати систему так, щоб одне з тіл було в певний момент часу нерухомим відносно цієї системи.

Приклади розв'язування фізичних задач на застосування законів збереження

Задача 1. Людина масою $m_1 = 60$ кг біжить зі швидкістю $v_1 = 8 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ й застрибує на візок масою $m_2 = 80$ кг, який рухається із швидкістю $v_2 = 2,9 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. З якою швидкістю u рухатиметься візок, якщо людина біжить в тому ж напрямку? Назустріч?

Дано:

$$m_1 = 60 \text{ кг}$$

$$m_2 = 80 \text{ кг}$$

$$v_1 = 8 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 2,22 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 2,9 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 0,81 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

u — ?;

u' — ?

Розв'язок

Система «людина — візок» — замкнута.

а) Людина наздоганяє візок. За законом збереження імпульсу: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u$, звідки

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}; u = 5,14 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 1,43 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

б) Людина біжить назустріч візку. За законом збереження імпульсу:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u', \text{ звідки } u' = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}; u' = 1,71 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 0,475 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Відповідь: а) $u = 5,14 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 1,43 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; б) $u' = 1,71 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 0,475 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Застосування закону збереження енергії спрощує розв'язування задач, у яких розглядаються два стани системи, і не вимагає розглядати сили, що діють між тілами.

Для розв'язування задач цього типу слід визначити два стани системи, потім обрати рівень відліку потенціальної енергії (нульовий рівень). Визначивши повну енергію системи в обох випадках, записують закон збереження енергії: $E_1 = E_2$.

Якщо перехід системи тіл з початкового стану в кінцевий здійснюється під дією зовнішніх сил, треба скласти рівняння: $E_2 - E_1 = A$, де A — робота цих сил.

Задача 2. Камінь кинули вертикально вгору з початковою швидкістю 10 м/с. На якій висоті його кінетична енергія дорівнює потенціальній?

Дано:

$$v_0 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

h — ?

Розв'язок

Відповідно до закону збереження енергії $E_{к0} + E_{п0} = E_{к1} + E_{п1}$. З огляду на те, що $E_{к1} = E_{п1}$, одержуємо $\frac{m v_0^2}{2} + 0 = mgh + mgh = 2mgh$. Тоді $h = \frac{v_0^2}{4g}$. Перевіряємо одини-

ці величин:

$$[h] = \frac{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \text{м}. \text{ Обчислюємо висоту: } h = \frac{10^2}{4 \cdot 9,8} \approx 2,5 \text{ (м)}.$$

Відповідь: 2,5 м.

Під час розв'язування комбінованих задач необхідно одночасно застосовувати і закон збереження імпульсу, і закон збереження енергії. Для опису фізичних явищ іноді варто доповнювати названі закони рівняннями другого закону динаміки. До цієї групи належать задачі, в яких розглядаються непружні та пружні (центральні й нецентральні) зіткнення.

Слід пам'ятати, що під час непружного удару механічна енергія системи не зберігається: деяка її частина переходить у внутрішню, що проявляється у нагріванні й деформації тіл.

У комбінованих задачах рівняння закону збереження і перетворення енергії є одним з основних, яке поряд із рівняннями другого закону динаміки і збереження імпульсу становить повну систему рівнянь, що описують певне явище. Особливо зручно, а іноді й необхідно, використовувати закон збереження енергії під час розв'язування задач, у яких:

- а) задається рух одного тіла;
- б) розглядається нерівномірний змінний рух.

Загальний алгоритм розв'язування задач, що потребують складання рівняння закону збереження енергії, можна подати так:

- виконати схематичний малюнок і записати основну формулу;
- установити перше і друге положення тіла, що розглядається (звичай початкове і кінцеве);
- вибрати нульовий рівень відліку потенціальної енергії (довільно, за найнижчим положенням тіла під час руху або за тим, на який воно опускається, переходячи з першого положення в друге);
- зобразити сили, що діють на тіло в зазначеній точці траєкторії, або, якщо такої немає, у довільній, і позначити кінематичні характеристики v і h , що визначають його механічну енергію в першому і другому положеннях;
- записати формули обчислення роботи зовнішніх сил і повної механічної енергії в обох положеннях. Підставити їх у вихідне рівняння.

У простих задачах отримане рівняння містить, як правило, одну шукану величину, у складніших — дві та більше. Якщо невідомих більше одного, то до складеного рівняння закону збереження енергії додають основне рівняння динаміки матеріальної точки, кінематичні рівняння руху або закону збереження імпульсу. Розв'язуючи одержану систему рівнянь, визначаємо шукану величину.

Задача 3. Тіло масою 3 кг рухається зі швидкістю $v_1 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і вдаряється об нерухоме тіло масою $m_2 = m_1$. Вважаючи удар центральним і непружним, знайти кількість теплоти, що виділилася під час удару.

Дано:
 $m = 3 \text{ кг}$
 $v_1 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
 $m_1 = m_2$
 $Q = ?$

Розв'язок

Кількість теплоти, що виділилася внаслідок удару, визначається різницею енергії системи до і після удару:
 $Q = E_1 - E_2$.

Перше тіло до удару мало кінетичну енергію $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Кінетична енергія другого тіла дорівнювала нулю. Після непружного удару обидва тіла рухатимуться зі спільною швидкістю u , тому кінетична енергія системи дорівнює

$$E_k = (m_1 + m_2)u^2/2.$$

Спільну швидкість руху двох тіл визначаємо на основі закону збереження імпульсу: $m_1v = (m_1+m_2)u$, звідки знаходимо: $u = \frac{m_1v_1}{m_1 + m_2}$. Під-

ставивши це значення у формулу кінетичної енергії обох тіл, одержимо:

$$Q = \frac{m_1v_1^2}{2} - \frac{m_1^2v_1^2}{2(m_1 + m_2)}.$$

Підставивши числові значення одержимо $Q = 22 \text{ Дж}$.

Відповідь: 22 Дж.

Задача 4. Важка куля зісковзує без тертя похилою поверхнею, яка переходить у «мертву петлю» радіусом R . З якої висоти H має скочуватися куля, щоб не відірватися від петлі у верхній її точці?

Дано:
 R
 $H = ?$

Розв'язок

Висоту H вимірюємо від поверхні столу. У точці A потенціальна енергія кулі дорівнює mgH , а кінетична — нулю.

Повна енергія кулі становить: $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = mgH + 0 = mgH$. У верхній точці петлі на висоті $h = 2R$ потенціальна енергія кулі $E = mgh = 2mgR$, а кінетична — $\frac{mv^2}{2}$. Отже, повна енергія в точці B дорівнює $2mgR + \frac{mv^2}{2}$.

За законом збереження повної енергії $mgH = 2mgR + \frac{mv^2}{2}$. Звідки $v^2 = 2gH - 4gR$ (1).

Щоб куля рухалася по колу, рівнодійна всіх сил, що діють на неї, має надавати їй доцентрового прискорення. На кулю у верхній точці петлі діють: сили тяжіння $P = mg$ і реакції поверхні N . Їх рівнодійна надає кулі прискорення $a = \frac{v^2}{R}$, де R — радіус петлі, а v — лінійна швидкість кулі.

Спрямуємо координатну вісь OX вертикально вниз. За другим законом Ньютона: $mg + N = m \frac{v^2}{R}$. Мінімальна висота, за якої куля описує «мертву петлю», буде за умови $N = 0$. Тоді рівняння другого закону

Ньютона має вигляд: $mg = \frac{mv^2}{R}$. Звідси одержуємо $v^2 = gR$ (2). З рівнянь

(1) і (2) знаходимо: $H = \frac{5}{2}R$.

Відповідь: $H = \frac{5}{2}R$.

Задача 5. Для визначення початкової швидкості руху кулі масою 10 г стріляють у дерев'яний брусок масою 6 кг, який підвішений на нитках. Брусок із кулею, що в ньому застряє, піднімається на висоту 49 мм. Визначити: а) початкову швидкість кулі; б) її кінетичну енергію в момент пострілу; в) яка частина механічної енергії перетворюється у внутрішню.

Дано:
 $m_1 = 10^{-2}$ кг
 $m_2 = 6$ кг
 $h = 4,9 \cdot 10^{-2}$ м

Розв'язок

Систему «брусок — куля» можна вважати ізольованою, оскільки в момент удару кулі в брусок усі сили, що діють на них, зрівноважені, опором повітря нехтуємо (мал. 19.2).

За законом збереження імпульсу: $m_1 \vec{v}_0 = (m_1 + m_2) \vec{u}$.

У проекціях на вісь OX маємо: $m_1 v_0 = (m_1 + m_2) u$. Звідси

знаходимо $v_0 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} u$.

v_0 — ?
 E_k — ?
 ΔE — ?

Швидкість бруска з кулею в момент удару (u) визначаємо, застосовуючи закон збереження енергії: $\frac{(m_1 + m_2)u^2}{2} = (m_1 + m_2)gh$, звідки $u = \sqrt{2gh}$.

Початкова швидкість кулі: $v_0 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \sqrt{2gh}$.

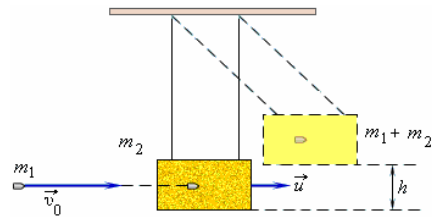
Кінетична енергія кулі в момент пострілу становить: $E_k = \frac{m_1 v_0^2}{2}$.

Частина механічної енергії ΔE , що перетворюється у внутрішню, дорівнює різниці кінетичної енергії кулі у початковий момент і потенціальної енергії бруска з кулею у кінцевий:

$$\Delta E = \frac{m_1 v_0^2}{2} - (m_1 + m_2)gh.$$

Обчислюємо:

$$v_0 = \frac{6 \text{ кг} + 10^{-2} \text{ кг}}{10^{-2} \text{ кг}} \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \approx 589 \frac{\text{М}}{\text{с}};$$



Мал. 19.2

$$E_k = \frac{10^{-2} \text{ кг} \left(589 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2}{2} \approx 1734 \text{ Дж};$$

$$\Delta E = 1734,6 \text{ Дж} - 6,02 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,049 \text{ м} \approx 1731,7 \text{ Дж}$$

Відповідь: $v_0 \approx 589 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $E_k \approx 1734 \text{ Дж}$; $\Delta E \approx 1731,7 \text{ Дж}$.

! Головне в цьому параграфі

Повною механічною енергією системи називають суму потенціальної та кінетичної енергій:

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}.$$

Якщо в замкнутій системі діють консервативні сили, її повна механічна енергія є величиною постійною. Можливе лише взаємне перетворення потенціальної та кінетичної енергії системи.

Повна механічна енергія замкнутої системи є величиною постійною: $E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}$.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке повна механічна енергія тіла чи системи тіл?
2. Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії системи тіл.
3. На яку висоту похилою площиною підніметься кулька, яка рухається із швидкістю 5 м/с?
4. Для стискання пружини на 1 см потрібно докласти силу 1 Н. Яку енергію повинна мати рухома кулька, щоб стиснути в горизонтальній площині пружину на 10 см.
5. На яку висоту потрібно підняти тіло масою 1 кг, щоб його потенціальна енергія дорівнювала кінетичній на 10-й секунді вільного падіння?

Вправа до § 19

- 1 (с). З якою швидкістю має летіти хокейна шайба масою 160 г, щоб її імпульс дорівнював імпульсу кулі масою 2 г, яка летить із швидкістю 600 м/с?
- 2 (с). Два непружні тіла масами 2 кг і 6 кг рухаються назустріч одне одному зі швидкістю 2 м/с кожне. Визначте модуль і напрямок швидкості тіл після їх зіткнення.
- 3 (с). Куля масою 0,1 кг рухається із швидкістю 5 м/с і стикається з перпоною, від якої відлітає із швидкістю 4 м/с. Чому дорівнює зміна імпульсу кулі?
- 4 (д). Сталева кулька масою 20 г падає з висоти 1 м на сталеву плиту і відскакує від неї на висоту 81 см. Визначте: а) імпульс сили, яка діє на плиту під час удару; б) кількість теплоти, що виділяється.
- 5 (д). Людина стоїть на нерухомому візку і кидає горизонтально камінь масою 8 кг із швидкістю 5 м/с відносно Землі. Визначте, яку роботу вона виконує, якщо маса візка разом з людиною — 160 кг. Проаналізуйте залежність роботи від маси. Тертям можна знехтувати.

- 6 (д).** Куля, що летіла горизонтально зі швидкістю 40 м/с, потрапляє у брусок, підвішений на нитці завдовжки 4 м, і застряє у ньому. Визначте кут, на який відхилиться брусок, якщо маса кулі становить 20 г, а бруска — 5 кг.
- 7 (в).** Два вантажі масами 10 і 15 кг, підвішені на нитках завдовжки 2 м так, що вони дотикаються один до одного. Менший вантаж відхилили на кут 60° і відпустили. На яку висоту піднімуться обидва вантажі після удару? Удар вважати непружним. Яка кількість теплоти при цьому виділяється?
- 8 (в).** Дві кулі підвішені на паралельних нитках однакової довжини так, що вони дотикаються одна до одної. Маса куль — 0,2 кг і 100 г. Першу кулю відхиляють так, що її центр ваги піднімається на висоту 4,5 см, і відпускають. На яку висоту піднімуться кулі після удару, якщо удар: а) пружний; б) непружний?
- 9 (д).** Свинцева куля масою 500 г, що рухається зі швидкістю 10 см/с, вдаряється у нерухому кулю з воску масою 200 г, після чого вони рухаються разом. Визначити кінетичну енергію куль після удару.
- 10 (в).** Потужність гідроелектростанції становить 73,5 МВт, ККД — 0,75. Визначте, на який рівень гребля піднімає воду, якщо витрата води становить $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$.
- 11 (в).** Двигун насоса, розвиваючи потужність 25 кВт, піднімає 100 м^3 нафти на висоту 6 м за 8 хв. Визначте ККД установки.

Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (п).** Чи на однакову відстань можна кинути камінь уперед, стоячи на: а) землі; б) ковзанах на кризі?
- 2 (п).** Щоб зійти на берег, рибак рушив від корми човна до його носової частини. Чому човен відплив від берега?
- 3 (п).** Легкий тенісний м'ячик, по якому вдарили ногою, полетів у напрямку руху ноги. Якої швидкості v він набув, якщо швидкість руху ноги в момент удару u — 10 м/с?
- 4 (с).** З рушниць масою $m_1 = 5$ кг вилітає куля масою $m_2 = 5$ г із швидкістю $v_2 = 600$ м/с. Визначте швидкість v_1 віддачі рушниці.
- 5 (с).** Тенісний м'яч, що летить із швидкістю $v_1 = 15$ м/с, відбивається ракеткою в протилежному напрямку із швидкістю $v_2 = 20$ м/с. Знайдіть зміну імпульсу $m\Delta v$ м'яча, якщо відомо, що його кінетична енергія збільшилася на $\Delta W = 8,75$ Дж.
- 6 (с).** Куля масою 8 г, яка летіла із швидкістю 500 м/с, пробила дошку завтовшки 4 см. Знайдіть швидкість руху кулі відразу після проходження крізь неї, якщо середня сила опору дошки дорівнює 9 кН.
- 7 (с).** Яку роботу A потрібно виконати, щоб змусити рухоме тіло масою $m = 2$ кг: а) збільшити швидкість від $v_1 = 2$ м/с до $v_2 = 5$ м/с; б) зупинитися, якщо початкова швидкість $v_0 = 8$ м/с?
- 8 (с).** Камінь, що рухається поверхнею криги зі швидкістю $v = 3$ м/с, подолав до зупинки відстань $s = 20,4$ м. Знайдіть коефіцієнт тертя каменя об кригу.
- 9 (д).** Яка мінімальна робота A виконується під час піднімання на дах мотузки завдовжки $l = 40$ м і масою $m = 6$ кг? У початковий момент мотузка повністю звіщується вертикально з краю даху.

- 10 (д).** Вагон масою $m = 20$ т, рухаючись рівноприскорено ($a < 0$) з початковою швидкістю $v_0 = 54$ км/год, під дією сили тертя $F_{\text{тер}} = 6$ кН через деякий час зупиняється. Знайдіть роботу A сил тертя і відстань s , яку подолає вагон до зупинки.
- 11 (д).** Знайти роботу A , яку потрібно виконати, щоб збільшити швидкість руху тіла масою $m = 1$ т від $v_1 = 2$ м/с до $v_2 = 6$ м/с на шляху $s = 10$ м. На всьому шляху діє сила тертя $F_{\text{тер}} = 2$ Н.
- 12 (д).** Камінь падає з деякої висоти впродовж часу $t = 1,43$ с. Знайдіть кінетичну W_k і потенціальну W_n енергії каменю на середині шляху. Маса каменя $m = 2$ кг.
- 13 (д).** Із вежі висотою $h = 25$ м горизонтально кинуту камінь із швидкістю $v_0 = 15$ м/с. Визначте кінетичну W_k і потенціальну W_n енергії каменю через $t = 1$ с після початку руху. Маса каменя $m = 0,2$ кг.
- 14 (д).** На штовхання ядра під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту, затрачено роботу $A = 216$ Дж. Через який час t і на якій відстані s_x від місця штовхання ядро впаде на землю? Маса ядра $m = 2$ кг.
- 15 (д).** Тіло масою $m = 1$ кг ковзає спочатку похилою площиною висотою $h = 1$ м і довжиною схилу $l = 10$ м, а потім рухається горизонтальною поверхнею. Коефіцієнт тертя на всьому шляху $\mu = 0,05$. Знайдіть: а) кінетичну енергію W_k тіла біля основи площини; б) швидкість v тіла біля основи схилу; в) відстань s , пройдену тілом горизонтальною поверхнею до зупинки.
- 16 (д).** Тіло ковзає спочатку похилою площиною, що становить кут $\alpha = 8^\circ$ з горизонтом, а потім горизонтальною поверхнею. Визначте коефіцієнт тертя на усьому шляху, якщо відомо, що тіло долає горизонтальну площину ту ж відстань, що й похилою площиною.
- 17 (д).** Граната, що летить із швидкістю $v = 10$ м/с, розірвалася на два осколки. Більший — масою $0,6m$ маси гранати, продовжує рух в тому ж напрямку, але з більшою швидкістю $u_1 = 25$ м/с. Знайдіть швидкість u_2 меншого осколка.
- 18 (д).** Тіло масою $m_1 = 1$ кг, що рухається горизонтально зі швидкістю $v_1 = 1$ м/с, наздоганяє інше тіло масою $m_2 = 0,5$ кг і непружно вдарається об нього. Яких швидкостей набувають тіла, якщо: а) друге тіло нерухоме; б) друге тіло рухається зі швидкістю $v_2 = 0,5$ м/с в тому ж напрямку, що й перше; в) друге тіло рухається протилежно із швидкістю $v_2 = 0,5$ м/с?
- 19 (д).** Ковзаняр масою $M = 70$ кг кидає горизонтально камінь масою $m = 3$ кг із швидкістю $v = 8$ м/с. На яку відстань s він відкотиться, якщо коефіцієнт тертя ковзанів об кригу дорівнює $0,02$?
- 20 (д).** З гармати масою $m_1 = 5$ т вилітає снаряд масою $m_2 = 100$ кг. Кінетична енергія снаряда $W_{k2} = 7,5$ МДж. Яку кінетичну енергію W_{k1} отримує гармата внаслідок віддачі?
- 21 (д).** Тіло масою $m_1 = 2$ кг, рухаючись із швидкістю $v_1 = 3$ м/с, наздоганяє інше тіло масою $m_2 = 8$ кг, що рухається із швидкістю $v_2 = 1$ м/с. Вважаючи удар центральним, знайдіть швидкості u_1 і u_2 тіл після удару, якщо удар а) непружний; б) пружний.

- 22 (д).** Тіло масою $m_1 = 5$ кг ударяється об нерухоме тіло масою $m_2 = 2,5$ кг, яке після удару розпочинає рухатися з кінетичною енергією $W'_{k2} = 5$ Дж. Вважаючи удар центральним і пружним, визначте кінетичну енергію W_{k1} і W'_{k1} першого тіла до м після удару.
- 23 (д).** Тіло масою $m_1 = 5$ кг ударяється об нерухоме тіло масою $m_2 = 2,5$ кг. Кінетична енергія системи двох тіл безпосередньо після удару $W'_{k1} = 5$ Дж. Вважаючи удар центральним і непружним, знайдіть кінетичну енергію W_{k1} першого тіла до удару.
- 24 (в).** Два тіла рухаються одне назустріч одному і вдаряються непружно. Швидкості тіл до удару становили $v_1 = 2$ м/с і $v_2 = 4$ м/с. Загальна швидкість тіл після удару $u = 1$ м/с за напрямком збігається із напрямком швидкості v_1 . У скільки разів кінетична енергія W_{k1} першого тіла більша ніж другого W_{k2} ?
- 25 (в).** Сталева кулька, падаючи з висоти $h_1 = 1,5$ м на сталеву плиту, відскакує від неї зі швидкістю $v_2 = 0,75v_1$, де v_2 — швидкість, з якою вона підлітає над плитою. На яку висоту h_2 вона підніметься? Який час мине з моменту падіння до наступного удару об плиту?
- 26 (в).** Тіло масою $m_1 = 2$ кг рухається назустріч іншому масою $m_2 = 1,5$ кг і непружно вдаряється об нього. Швидкості тіл безпосередньо перед ударом становили $v_1 = 1$ м/с і $v_2 = 2$ м/с. Який час рухатимуться тіла після удару, якщо коефіцієнт тертя дорівнює 0,05?
- 27 (в).** Нейтрон (маса m_0) ударяється об нерухоме ядро атома вуглецю ($m = 12m_0$). Вважаючи удар центральним і пружним, знайдіть у скільки разів зменшиться кінетична енергія W_k нейтрона під час удару.

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№5)

- 1 (п).** Хлопчик кинув м'яч у горизонтальному напрямку. Опором повітря можна знехтувати. Виберіть правильне твердження.
А Імпульс м'яча перед ударом об землю напрямлений вертикально.
Б Імпульс м'яча під час його руху не змінюється за напрямком.
В Сума потенціальної і кінетичної енергій під час руху м'яча залишається незмінною.
Г Кінетична енергія м'яча під час його руху не змінюється.
- 2 (п).** Установіть відповідність між назвами формул, що стосуються законів збереження, і самими формулами.
- | | |
|--------------------------------|---|
| 1 Імпульс сили | А $N = F \cdot v$ |
| 2 Робота сили тяжіння | Б $E = N \frac{mv^2}{2}$ |
| 3 Робота сили пружності | В $F \cdot \Delta t = m \Delta v$ |
| 4 Кінетична енергія | Г $A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2)$ |
| | Д $A = mg(h_1 - h_2)$ |
- 3 (с).** Установіть відповідність між деякими умовами (або властивостями) та їх об'єктуванням.

- 1 Умова, за якої імпульс тіла не змінюється.
- 2 Умова виконання закону збереження імпульсу.
- 3 Умова, за якої робота певної сили дорівнює нулю.
- 4 Для яких сил можна визначити потенціальну енергію.
- А** Система тіл, які взаємодіють, має бути замкнутою, тобто тіла цієї системи взаємодіють лише одне з одним, а не взаємодіють з іншими, які не належать їй.
- Б** Крім сил тяжіння та пружності, між тілами системи діє сила тертя.
- В** Для сил, робота яких під час руху замкнутою траєкторією дорівнює нулю.
- Г** Рівнодійна всіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю.
- Д** Переміщення тіла дорівнює нулю.

4 (с). Куля, що рухалася зі швидкістю \vec{v}_0 , зазнала лобового пружного зіткнення з нерухомим кубом. Установіть відповідність «напрямок і модуль кінцевої швидкості руху \vec{v} кулі — співвідношення мас кулі та куба».

- 1 Напрямок руху кулі не змінився, $v = 0,5v_0$.
- 2 Куля зупинилась, $v = 0$.
- 3 Куля відскочила назад, $v = 0,5v_0$.
- 4 Куля відскочила назад, v практично дорівнює v_0 .
- А** Маса кулі дорівнює масі куба.
- Б** Маса кулі в кілька разів більша за масу куба.
- В** Маса кулі в кілька разів менша від маси куба.
- Г** Маса кулі в багато разів менша від маси куба.
- Д** Маса кулі в багато разів більша за масу куба.

5 (с). Камінь і м'яч розташовані на висоті 5 м. Імпульс і кінетична енергія каменя дорівнюють $8 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ і 16 Дж відповідно, а імпульс і кінетична енергія м'яча — $8 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ і 32 Дж . Опором повітря нехтуємо. Виберіть правильне твердження:

- А** Маса м'яча більша, ніж каменя.
- Б** У початковий момент швидкість руху каменя більша, ніж м'яча.
- В** У початковий момент потенціальна енергія каменя у 2 рази більша, ніж м'яча.
- Г** Під час падіння на землю швидкість руху м'яча менша, ніж каменя.

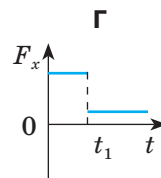
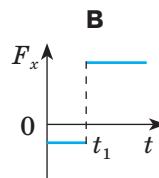
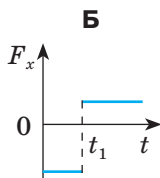
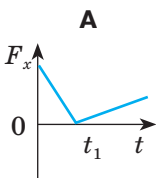
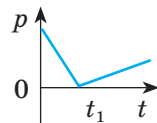
6 (с). Вагонетка масою m_1 , яка рухається зі швидкістю v , налітає на нерухому вагонетку масою m_2 . Опором руху можна знехтувати. Виберіть правильне твердження.

- А** Якщо зіткнення є пружним і $m_1 = m_2$, перша вагонетка після зіткнення зупиниться.
- Б** Під час пружного зіткнення виконується лише закон збереження енергії.
- В** Якщо зіткнення є непружним і $m_1 < m_2$, кінцева швидкість руху обох вагонеток буде більше ніж $v/2$.
- Г** Якщо зіткнення є непружним і $m_1 = m_2 = m$, механічна енергія вагонеток зменшиться на $\frac{mv^2}{2}$.

- 7 (с).** Швидкість руху тіла масою 1 кг, яке вільно падає, збільшилася від 2 до 4 м/с. Опором повітря нехтуємо. Виберіть правильне твердження.
А Імпульс тіла зменшився у 2 рази.
Б Кінетична енергія тіла збільшилася у 2 рази.
В Потенціальна енергія тіла зменшилася на стільки ж, на скільки збільшилася кінетична.
Г Робота сили тяжіння дорівнює нулю.
- 8 (с).** Куля, що летить горизонтально, наскрізь пробиває дерев'яний брусок, який лежить на гладенькій горизонтальній поверхні. Виберіть правильне твердження.
А Кінетична енергія кулі зменшилася на стільки ж, на скільки збільшилася кінетична енергія бруска.
Б Під час руху кулі крізь брусок робота сили, що діє на неї з боку бруска, є додатною.
В Під час руху кулі крізь брусок робота сили опору, що діє на брусок з боку кулі, є додатною.
Г Коли куля рухається всередині бруска, механічна енергія системи «куля + брусок» зберігається.
- 9 (д).** М'яч масою 0,5 кг, рухаючись горизонтально зі швидкістю 10 м/с, налітає на стіну й відскакує від неї із швидкістю 8 м/с. Якщо початкова швидкість м'яча напрямлена перпендикулярно до стіни, виберіть правильне твердження.
А Зіткнення м'яча із стіною є пружним.
Б Зміна імпульсу м'яча за модулем дорівнює $9 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
В Імпульс сили, що діє на стіну під час удару, менший за $8 \text{ Н} \cdot \text{с}$.
Г Під час взаємодії м'яча зі стіною виділилося більше ніж 10 Дж теплоти.
- 10 (д).** Снаряд масою 40 кг, що летить горизонтально зі швидкістю 400 м/с, влучає в нерухому платформу з піском і застрягає в ньому. З якою швидкістю рухатиметься платформа?

- А** 1,6 м/с **Б** 20 м/с **В** 200 м/с **Г** 400 м/с

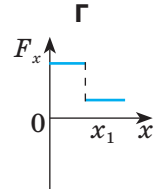
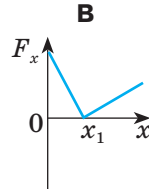
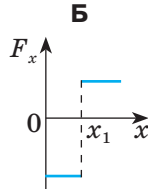
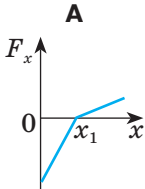
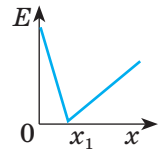
- 11 (д).** На рисунку показано залежність імпульсу автомобіля від часу. Який із графіків зміни сили з часом, що діє на автомобіль, відповідає цій залежності?



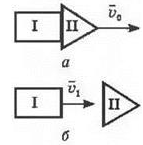
- 12 (д).** Рух кульки масою 500 г описується рівнянням $x = 0,5 - 4t + 2t^2$. Визначте імпульс кульки через 3 с після початку відліку часу.

- А** 4 кг·м/с **Б** 8 кг·м/с **В** 12 кг·м/с **Г** 16 кг·м/с

13 (д). Санчата ковзають горизонтальною поверхнею. На рисунку відображено залежність їх механічної енергії від координати. На якому з графіків наведено залежність сили, що діє на санчата, від координати?

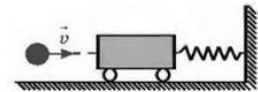


14 (д). Ракета, що складається з двох ступенів, рухається зі швидкістю $v_0 = 6$ км/с. Ступінь I після відокремлення рухається зі швидкістю $v_1 = 2$ км/с. Маса ступеня I — $m_1 = 1 \cdot 10^{30}$ кг, ступеня II — $m_2 = 2 \cdot 10^{30}$ кг. З якою швидкістю рухатиметься II ступінь після відокремлення першого?



- А** 2 км/с **Б** 4 км/с **В** 6 км/с **Г** 8 км/с

15 (д). Пластилінова куля масою 0,1 кг зі швидкістю 1 м/с налітає на нерухомий візок масою 0,1 кг, прикріплений до пружини (рисунок), і прилипає до нього. Яка повна енергія системи під час її подальших коливань? Тертям знехтувати.



- А** 0,025 Дж **Б** 0,05 Дж **В** 0,5 Дж **Г** 0,1 Дж

16 (д). Куля масою 10 г, що летить із швидкістю 800 м/с, пробиває дошку завтовшки 8 см. Швидкість кулі зменшується до 400 м/с. Знайдіть середню силу опору, що діє на кулю.

- А** 12 кН **Б** 20 кН **В** 30 кН **Г** 62 кН

17 (д). Людина і візок рухаються назустріч одне одному, причому маса людини у 2 рази більша, ніж візка. Швидкість людини становить 2 м/с, а візка — 1 м/с. Людина заскакує на візок і залишається на ньому. Якою стала швидкість людини разом із візком?

18 (д). Потяг масою 2000 т, рухаючись із місця з прискоренням $0,2$ м/с², досягає номінальної швидкості через 1 хв. Визначте середню потужність потягу, якщо коефіцієнт опору руху становить 0,005.

19 (д). Камінь масою 0,4 кг кинули вертикально вгору зі швидкістю 20 м/с. Чому дорівнюють кінетична й потенціальна енергії каменя на висоті 15 м?

- 20 (в).** Снаряд, випущений із гармати вертикально вгору, розірвався в точці максимального підйому на висоті 45 м від поверхні землі на два уламки, маси яких відносяться як 1 : 4. Уламок більшої маси полетів горизонтально зі швидкістю 20 м/с. На якій відстані від точки пострілу впаде уламок меншої маси? Вважайте поверхню Землі плоскою і горизонтальною, $g = 10 \text{ м/с}^2$, опором повітря знехтуйте.
- 21 (в).** Камінь масою $m = 1 \text{ кг}$ кинута вертикально вгору з початковою швидкістю $v_0 = 9,8 \text{ м/с}$. Побудуйте графік залежності кінетичної W_k , потенціальної W_p і повної W енергії каменя від часу t на інтервалі $0 < t < 2\pi$.
- 22 (в).** Тіло масою $m = 3 \text{ кг}$, маючи початкову швидкість $v_0 = 0$, ковзає похилою площиною висотою $h = 0,5 \text{ м}$ і довжиною $l = 1 \text{ м}$ із швидкістю $v = 2,45 \text{ м/с}$. Знайдіть коефіцієнт тертя тіла об площину і кількість теплоти Q , що виділяється під час ковзання.

§ 20. Межі застосування законів класичної механіки.

Основи спеціальної теорії відносності

- ▶ *Релятивістська механіка*
- ▶ *Принцип відносності Галілея-Ньютона*
- ▶ *Основні положення Спеціальної теорії відносності та їхні наслідки*

РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА. У попередніх параграфах ви розглядали основи класичної механіки. Проте вже на початку ХХ ст. виявилось, що деякі висновки класичної механіки не узгоджуються з дослідними результатами. Насамперед, це стосувалося руху швидких електронів, які перед тим були виявлені в катодних променях та в радіоактивному β -випромінюванні. Виникло питання про межі застосування класичної механіки.

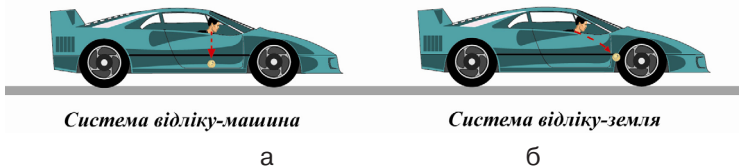
Було взято під сумнів справедливність перетворень за Галілеєм і класичний закон додавання швидкостей, який є безпосереднім результатом цих перетворень. Проблема виникла при спробах узгодити правила перетворень механічних величин із правилами перетворення величин, що характеризують електричні та магнітні поля. Саме ці поля є джерелом сил, які змушують заряджені частинки рухатися прискорено. Дослідження руху заряджених частинок при великих швидкостях (близьких до швидкості світла) виявили ряд розбіжностей з фундаментальними положеннями механіки Галілея — Ньютона.

Скінченність швидкості світла відіграє важливу роль у релятивістській механіці тому, що оптичні (зорові) спостереження є основним засобом отримання інформації про механічний рух. Ефекти запізнення сигналів є суттєвими при дослідженні швидких рухів.

Релятивістська механіка — розділ теоретичної фізики, який розглядає класичні закони руху тіл (частинок) при швидкостях руху v , порівнюваних зі швидкістю світла c .

ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ГАЛІЛЕЯ — НЬЮТОНА. Вивчаючи кінематику і динаміку, ви переконалися в тому, що всі механічні явища відбуваються однаково в усіх інерційних системах відліку за однакових початкових умов. Цей висновок дістав назву механічного принципу відносності. Він вказує на те, що жодними механічними дослідженнями всередині системи не можна встановити, чи перебуває в спокої інерційна система, чи рухається рівномірно і прямолінійно. Інакше кажучи, рівномірний і прямолінійний рух системи ніяк не впливає на механічні явища в ній.

Звернімося до такого прикладу. Нехай ви перебуваєте в автомобілі, що швидко рухається зі сталою швидкістю на прямолінійному відрітку шляху. Піднявши над головою монету, ви випускаєте її з рук. Як вона падатиме? Монета прямовисно упаде вниз і вдариться об підлогу в точці, розміщеній на одній вертикалі з точкою, де ви її випустили з руки (мал. 20.1, а; кабіна автомобіля закрита). Саме так — вертикально вниз — падають предмети на Землі, і наш експеримент у рухомому автомобілі проходить згідно з принципом відносності. З погляду спостерігача, який стоїть на землі, предмет, випущений з рук у кабіні автомобіля, рухається по кривій (мал. 20.1, б). Траєкторії монети виявляються різними в різних системах відліку. Але це зовсім не порушує принципу відносності, оскільки за ним стверджується, що закони механіки залишаються незмінними в усіх інерційних системах відліку. Закон всесвітнього тяжіння і закони Ньютона справджуються в обох цих системах відліку. Різниця між малюнками 20.1, а) та 20.1, б) полягає в тому, що в системі відліку, пов'язаній із землею (мал. 20.1, б), у монети є початкова швидкість, що дорівнює швидкості автомобіля. Закони фізики свідчать, що подібно до будь-якого кинутого під кутом до горизонту тіла, монета опише параболічну траєкторію. У системі відліку, пов'язаній з автомобілем, початкова швидкість монети дорівнює нулю, і закони фізики вказують, що монета падатиме вертикально вниз. Таким чином, закони руху в обох системах залишаються одними і тими самими, хоча траєкторії монети різні.



Мал. 20.1. Дослід із рухом монети у двох інерціальних системах відліку

Отже, закони механіки діють однаково в усіх інерційних системах відліку.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ.

Спостерігаючи за рухом зарядженої частинки, не так просто пояснити, чому в системі відліку, в якій заряджена частинка нерухома, навколо неї існує лише електростатичне поле, а з точки зору рухомої системи навколо рухомого заряду спостерігаємо магнітне поле.

Виникла потреба перегляду основ механіки і створення на нових засадах теорії руху тіл з великими швидкостями. Така теорія була створена в 1904—1905 р. завдяки зусиллям видатних вчених того часу — Гендріха Лоренца, Анрі Пуанкаре та Альберта Ейнштейна. Вона дістала назву спеціальної теорії відносності.

Спеціальна теорія відносності (СТВ) розглядає взаємозв'язок фізичних процесів, що відбуваються тільки в інерційних системах відліку, тобто в системах, які рухаються одна відносно іншої рівномірно і прямолінійно.

На основі спеціальної теорії відносності була розроблена релятивістська механіка.

Загальна теорія відносності (ЗТВ) описує взаємозв'язок фізичних процесів, що відбуваються в системах, які прискорено рухаються одна відносно іншої (неінерційних системах відліку).

Спеціальна теорія відносності базується на двох постулатах. Перший постулат є узагальненням класичного принципу відносності Галілея, і ми називатимемо його розширеним принципом відносності, або принципом відносності Пуанкаре — Ейнштейна, оскільки в працях цих вчених найчіткіше стверджувалось таке:

Усі закони природи, чи стосуються вони механіки, чи електродинаміки, чи гравітаційних взаємодій, чи будь-яких інших явищ та процесів, є однаковими в усіх інерціальних системах відліку.

Це означає, що всі інерціальні системи відліку еквівалентні (рівноправні). Жодні досліди в принципі не дають змоги виділити переважну (абсолютну) інерціальну систему відліку.

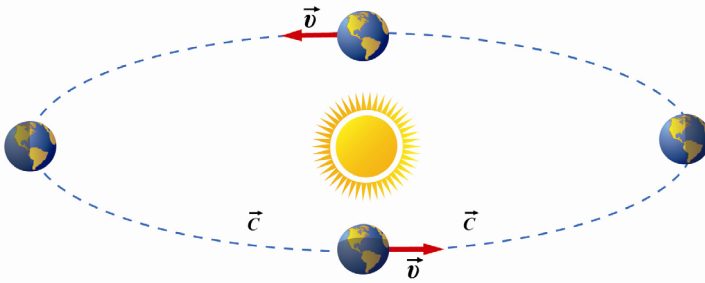
Другий постулат спеціальної теорії відносності — це постулат про сталість швидкості світла:

Швидкість світла однакова в усіх напрямках і не залежить від швидкості джерела світла чи приймача (спостерігача).

Постулат про сталість швидкості світла не є відкриттям новітньої фізики. Він неявно присутній в усіх астрономічних вимірюваннях, які ведуться не одну сотню років. Але його статус фундаментального закону природи був утверджений у працях творців спеціальної теорії відносності й опосередковано підтверджений експериментально у досліджах Альберта Майкельсона та Едуарда Морлі (1881 та 1887 рр.).

У цьому експерименті оцінювався вплив швидкості руху Землі навколо Сонця на швидкість поширення світла від джерела, що перебуває на Землі. Як показав дослід Майкельсона — Морлі, рух Землі відносно Сонця не впливає на швидкість поширення світла.

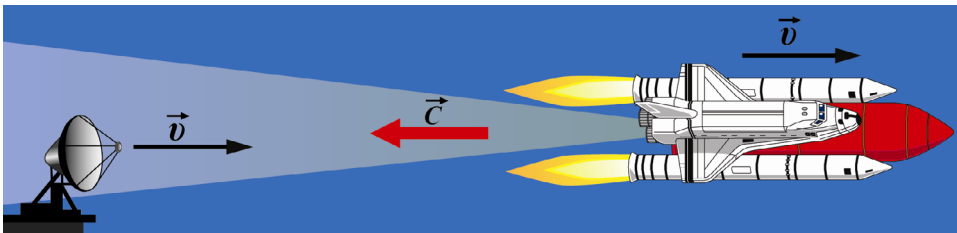
На мал. 20.2 схематично показано незалежність швидкості світла від напрямку руху Землі. Швидкість поширення світла в напрямі руху Землі (\vec{v}) навколо Сонця і в протилежному напрямі однакова і дорівнює швидкості світла у вакуумі (\vec{c}). Одержаний результат суперечив класичному за-



Мал. 20.2. Незалежність швидкості світла від напрямку руху Землі

кону додавання швидкостей, оскільки випливало, що швидкість світла не залежить від швидкості джерела світла чи приймача (спостерігача) (мал. 20.3). Нагадаємо, що згідно з класичним законом додавання швидкостей, коли тіло рухається відносно інерціальної системи зі швидкістю \vec{u} , а сама система рухається зі швидкістю \vec{w} відносно нерухомої системи, то швидкість \vec{v} тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює: $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$.

Згідно з постулатами СТВ швидкість світла — максимально можлива швидкість поширення будь-якої взаємодії. Вона є верхньою межею швидкості для всіх матеріальних тіл, тобто матеріальні тіла не можуть мати швидкість більшу, ніж швидкість світла.



Мал. 20.3. Незалежність швидкості світла у вакуумі від швидкості джерела і приймача

! Головне в цьому параграфі

Релятивістська механіка вивчає рух тіл зі швидкостями, близькими до швидкості світла.

Спеціальна теорія відносності (СТВ) розглядає взаємозв'язок фізичних процесів, що відбуваються тільки в інерціальних системах відліку.

Загальна теорія відносності (ЗТВ) описує взаємозв'язок фізичних процесів, що відбуваються в системах, які прискорено рухаються одна відносно одної (неінерціальних системах відліку).

Перший постулат СТВ Ейнштейна — усі закони природи однакові в інерціальних системах відліку.

Другий постулат СТВ — швидкість світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних системах відліку.

§ 21. Відносність часу та лінійних розмірів тіл.

Релятивістський закон додавання швидкостей

- ▶ *Відносність одночасності та часових інтервалів*
- ▶ *Відносність лінійних розмірів тіл*
- ▶ *Релятивістський закон додавання швидкостей*

ВІДНОСНІСТЬ ОДНОЧАСНОСТІ ТА ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ. У попередньому параграфі зазначалось, що в механіці Ньютона час, який відповідає певній події, єдиний у всіх системах відліку. Це припущення ґрунтується на можливості синхронізувати годинники в різних системах відліку за рахунок миттєвої передачі інформації. Тобто в механіці Ньютона достатньо одного годинника для опису подій в різних системах відліку, оскільки перебіг часу однаковий для всіх спостерігачів у всіх інерційних, і не тільки, системах відліку.

Такі поняття, як «тепер», «раніше», «пізніше», «одночасно», мають абсолютне значення, незалежне від вибору системи відліку.

Разом із тим інформація поширюється не миттєво. Події, що відображаються на екрані телевізора, відбуваються не в момент їх спостереження (навіть під час прямої трансляції). Електромагнітне випромінювання поширюється зі швидкістю світла. Це означає, що випромінювання, яке виходить від телевежі, розміщеної на відстані, наприклад, $l_1 = 30$ км від будинку, доходить до антени-приймача за час:

$$t_1 = \frac{l_1}{c} = \frac{3 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^8} = 10^{-4} \text{ с}.$$

Отже, ми спостерігаємо на екрані події з минулого, хоча й дуже близького. Дивлячись у вікно на зоряне небо, ми ніби «зондуємо» минуле. Адже світло від Місяця доходить до Землі за 1,3 с, від Марса — за 5 хв, від Сонця — за 8 хв. Одні зорі так, як «тепер», виглядали декілька років тому, інші — мільйони років тому тощо.

Одночасність — не абсолютна характеристика явищ. Різні спостерігачі можуть мати різні уявлення про одночасність подій.

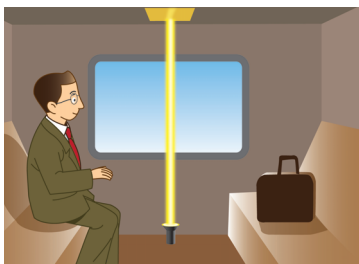
Події, одночасні в одній інерціальній системі відліку, не одночасні в інших системах, рухомих відносно першої. Одночасність подій відносна.

Розглянемо такий приклад. Припустимо, що на підлозі вагона розташоване джерело світла, а на стелі — дзеркало. Яким буде інтервал часу, протягом якого світло досягне стелі та, відбившись від дзеркала, повернеться назад?

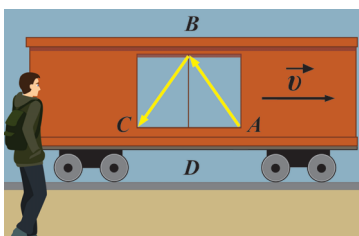
Для спостерігача, що перебуває у вагоні (мал. 21.1), цей час дорівнює частці подвоєної відстані від підлоги до стелі (висота вагона BD) на швид-

кість світла c : $t_0 = \frac{2BD}{c}$.

Цей інтервал часу не залежить від того, нерухомий вагон чи рухається він рівномірно і прямолінійно.



Мал. 21.1. Поширення світлового сигналу відносно спостерігача, що рухається разом із вагоном



Мал. 21.2. Поширення світлового сигналу відносно нерухомого спостерігача

Розв'яжемо задачу відносно нерухомого спостерігача (в іншій інерціальній системі відліку), відносно якого вагон рухається зі швидкістю \vec{v} праворуч (мал. 21.2).

Відносно нерухомого спостерігача світло проходить відстань $2AB$. Отже, час проходження світлового сигналу дорівнює:

$$t = \frac{2AB}{c}$$

Оскільки гіпотенуза AB більша катета BD , то $t > t_0$. І чим більша швидкість руху вагона v , тим відчутніша ця нерівність.

Встановимо математичну залежність між t і t_0 . Для цього виразимо відповідні відстані: $AB = ct$, $BD = ct_0$, $AD = vt$ і застосуємо теорему Піфагора до трикутника ABD : $(ct)^2 = (ct_0)^2 + (vt)^2$. Перетворимо цей вираз: $(c^2 - v^2)t^2 = c^2t_0^2$, звідки:

$$t^2 = \frac{c^2t_0^2}{c^2 - v^2} = \frac{t_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ або: } t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Оскільки $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, то $t > t_0$, тобто від-

носно нерухомого спостерігача подія, що відбувається у рухомій системі відліку, триває довше.

ВІДНОСНІСТЬ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ТІЛ. Довжина відрізка, яка в ньютонівській механіці вважалась абсолютною, також залежить від швидкості руху тіла відносно певної системи відліку.

Що означає виміряти довжину відрізка? Це означає одночасно вказати координати його початку і кінця ($l = x_2 - x_1$). Але, як ми вже знаємо, поняття одночасності є відносним. Події, одночасні в одній системі відліку, не одночасні в іншій.

Розглянемо процес вимірювання довжини докладніше. Нехай лінійка перебуває у вагоні, що рухається рівномірно і прямолінійно зі швидкістю \vec{v} . Лінійка розташована вздовж прямої, у напрямі якої відбувається рух поїзда. На одному кінці лінійки знаходиться джерело світла, а на іншому — дзеркало. Довжину лінійки визначають за часом проходження світла вздовж лінійки у прямому і зворотному напрямках. Для спостерігача, що перебуває у вагоні, цей час визначається формулою:

$$t_0 = \frac{2l_0}{c},$$

звідки: $l_0 = \frac{ct_0}{2}$. Для спостерігача, відносно якого вагон, а відповідно, і дзеркало, віддаляється зі швидкістю \vec{v} , час руху світлового сигналу до

дзеркала буде $t_1 = \frac{l}{c-v}$, а від дзеркала: $t_2 = \frac{l}{c+v}$. Загальний час руху:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{2lc}{c^2 - v^2}, \text{ звідки:}$$

$$l = \frac{c^2 - v^2}{2c} t. \quad (1)$$

Для встановлення зв'язку між l та l_0 згадаємо, що відносно спостерігача, який перебуває в рухомій системі відліку, час руху сигналу $t_0 = \frac{2l_0}{c}$, а для спостерігача, відносно якого рухається система, ця подія

відбувається повільніше: $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, або $t = \frac{2l_0}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Підставляючи

отриманий вираз у формулу (1), маємо:

$$l = \frac{c^2 - v^2}{2c} t = \frac{c^2 - v^2}{2c} \cdot \frac{2l_0}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \cdot \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Отже, відносно нерухомого спостерігача, від якого віддаляється система відліку, у якій проводять виміри, довжина лінійки не l_0 , а у

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ разів менша: } l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

На підставі наведених міркувань та отриманих формул можна зробити висновок, що лінійні розміри фізичних тіл не є абсолютними поняттями; вони залежать від системи відліку, відносно якої відбувається вимірювання. Зокрема, якщо взяти дві лінійки однакової довжини і одну з них примусити рухатися зі сталою швидкістю v , то нерухомому спостерігачеві вона здаватиметься коротшою.

Довжина тіла в системі відліку, у якій воно нерухоме, називається власною довжиною l_0 .

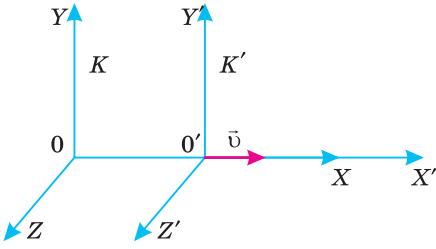
РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ. Знайдемо правило додавання швидкостей на основі постулатів СТВ.

Нехай тіло рухається відносно системи K' зі швидкістю \vec{u} , а сама система K' рухається відносно системи K , яка вважається нерухомою, з постійною швидкістю \vec{v} уздовж осі OX (мал. 21.3).

Якщо позначити швидкість тіла відносно нерухомої системи K через \vec{w} , то релятивістський закон додавання швидкостей матиме вигляд:

$$\vec{w} = \frac{\vec{v} + \vec{u}}{1 + \frac{\vec{v}\vec{u}}{c^2}},$$

де \vec{u} — швидкість руху тіла відносно рухомої системи відліку K' ; \vec{w} — швидкість руху тіла відносно нерухомої системи відліку K ; \vec{v} — швид-



Мал. 21.3.

Релятивістський закон додавання швидкостей

кість рухомої системи K' відносно нерухомої K .

Якщо $u \ll c$ та $v \ll c$, то $\vec{w} = \vec{v} + \vec{u}$ (закон додавання швидкостей у класичній механіці).

Якщо тіло рухається зі швидкістю світла відносно рухомої системи відліку K' ($u = c$), то його швидкість відносно нерухомої системи відліку

$$w = \frac{v + c}{1 + \frac{vc}{c^2}} = c \frac{v + c}{v + c} = c.$$

Тобто швидкість світла не можна збільшити за рахунок швидкості системи відліку, з якою джерело світла жорстко пов'язане. Отже, швидкість світла однакова в усіх інерційних системах відліку. Це означає, що релятивістський закон додавання швидкостей узгоджується з другим постулатом теорії відносності. Крім того, швидкість світла не залежить від швидкості руху джерела світла, підтверджуючи тим самим результати досліду Майкельсона — Морлі.

Для більш глибокого усвідомлення вами запропонованого навчального матеріалу розглянемо декілька прикладів задач. Під час їх розв'язування потрібно чітко встановити, яку систему відліку вважати рухомою, а яку — нерухомою. Варто визначити, яке саме тіло перебуває у стані спокою відносно рухомої системи відліку, і тоді параметри цього тіла вважати власними.

Задача 1. Система відліку K' рухається відносно системи відліку K зі швидкістю $\frac{2}{3}c$. Частинка рухається відносно системи відліку K' зі швидкістю $\frac{2}{3}c$. Визначити швидкість руху частинки в системі відліку K .

Дано:

$$v = \frac{2}{3}c$$

$$u = \frac{2}{3}c$$

w — ?

Розв'язання:

Оскільки рух усіх тіл відбувається в одному напрямі, то за релятивістським законом додавання швидкостей:

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} = \frac{\frac{2}{3}c + \frac{2}{3}c}{1 + \frac{\frac{2}{3}c \cdot \frac{2}{3}c}{c^2}} = \frac{4c}{3 \cdot \left(1 + \frac{4}{9}\right)} = \frac{12}{13}c, \text{ тобто } w < c.$$

Аналізуючи отриманий результат, бачимо, що за класичним законом додавання швидкостей було б: $w = \frac{2}{3}c + \frac{2}{3}c = \frac{4}{3}c$, тобто $w > c$, що неприпустимо, бо швидкість поширення світла у вакуумі є максимальною швидкістю передачі сигналу.

Відповідь: $0,92c$.

Задача 2. Космічні кораблі A і B віддаляються у протилежних напрямках зі швидкостями $2 \cdot 10^8$ м/с відносно Землі. У космічному кораблі A відбувається подія, яка триває 1 с. Якою буде тривалість цієї події відносно Землі і відносно корабля B ?

Дано:

$$v = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$t_0 = 1 \text{ с}$$

$$t_1 - ? \quad t_2 - ?$$

Розв'язок

Тривалість події відносно Землі визначається за

$$\text{формулою: } t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad t_1 = \frac{1 \text{ с}}{\sqrt{1 - \frac{\left(2 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}\right)^2}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}\right)^2}} \approx 1,3 \text{ с.}$$

Для визначення тривалості події відносно корабля B слід визначити відносну швидкість руху кораблів. Оскільки за умовою задачі космічні кораблі A і B віддаляються у протилежних напрямках зі швидкостями v відносно Землі, то можна один із кораблів (наприклад, B) прийняти за рухому систему відліку.

Оскільки кораблі рухаються у протилежних напрямках, то проекція вектора швидкості корабля B відносно Землі матиме від'ємний знак $-v$. Отже, швидкість корабля A відносно Землі v , швидкість корабля B відносно Землі $-v$. Їх відносна швидкість u .

Запишемо релятивістський закон додавання швидкостей з урахуванням умови задачі:

$$v = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}, \quad \text{звідки: } u = \frac{v + v}{1 + \frac{vv}{c^2}}.$$

Після підстановки числових значень: $u = 2,8 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. Отже, тривалість

$$\text{події відносно корабля } B \quad t_2 = \frac{1 \text{ с}}{\sqrt{1 - \frac{\left(2,8 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}\right)^2}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}\right)^2}} \approx 2,8 \text{ с}$$

Відповідь: 1,3 с; 2,8 с

! Головне в цьому параграфі

Одночасність — не абсолютна характеристика явищ. Різні спостерігачі можуть мати різні уявлення про одночасність подій. Події, одночасні в одній інерціальній системі відліку, не є одночасними в інших інерціальних системах, рухомих відносно першої. Одночасність подій відносна.

Відносно нерухомого спостерігача подія, що відбувається в рухомій

системі відліку, триває довше: $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Відносно нерухомого спостерігача, від якого віддаляється система відліку, в якій проводять виміри, лінійні розміри тіла будуть меншими:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Релятивістський закон додавання швидкостей має вигляд: $\bar{w} = \frac{\bar{v} + \bar{u}}{1 + \frac{\bar{v}\bar{u}}{c^2}}$,

де \bar{u} — швидкість руху тіла відносно рухомої системи відліку K' ; \bar{v} — швидкість руху тіла відносно нерухомої системи відліку K ; \bar{v} — швидкість рухомої системи K' відносно нерухомої K .

Якщо тіло рухається зі швидкістю світла відносно рухомої системи відліку, то його швидкість відносно нерухомої системи відліку дорівнює швидкості світла: $w = \frac{v+c}{1+\frac{vc}{c^2}} = c \frac{v+c}{v+c} = c$. Це означає, що релятивістський закон

додавання швидкостей узгоджується з другим постулатом теорії відносності.

Швидкість світла є максимально можливою швидкістю передачі взаємодій у природі.

? Запитання для самоперевірки

1. Чому не можна стверджувати, що події, які відбуваються одночасно в одній системі відліку, водночас відбуватимуться і в іншій? Що таке причинно-наслідкова подія?
2. Яка тривалість подій у різних інерціальних системах відліку?
3. Як впливає на вимірювання лінійних розмірів тіла рух системи, в якій відбувається вимірювання?
4. Що називають власним часом і власною довжиною?

Вправа до § 21

- 1 (д). Тіло рухається відносно рухомої системи відліку зі швидкістю $0,2c$, а відносно нерухомої — зі швидкістю $0,8c$, де c — швидкість поширення світла у вакуумі. З якою швидкістю рухається система відліку відносно нерухомої системи?
- 2 (д). Два тіла рухаються відносно нерухомого спостерігача рівномірно і прямолінійно у протилежних напрямках зі швидкостями $v_1 = 0,8c$ та $v_2 = -0,5c$. Визначте відносні швидкості цих тіл за класичним і релятивістським співвідношеннями.
- 3 (д). Частинки рухаються назустріч одна одній зі швидкістю $0,9c$. Визначте їх відносну швидкість.
- 4 (д). За якої відносної швидкості руху релятивістське скорочення довжини рухомого тіла становить 25 %?
- 5 (в). Яку швидкість повинне мати рухоме тіло, щоб його поздовжні розміри зменшились удвічі?
- 6 (в). У скільки разів збільшується час існування нестабільної частинки за годинником нерухомого спостерігача, якщо вона рухається зі швидкістю $0,99c$?

РОЗДІЛ 2.

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

Молекулярна фізика — це розділ фізики, який вивчає фізичні властивості речовини в різних агрегатних станах на основі її молекулярної будови. Методи молекулярної фізики пов'язані з вивченням руху і взаємодії атомів, молекул та іонів. Основним її завданням є вивчення фізичних властивостей речовин залежно від їхньої внутрішньої будови.

У молекулярній фізиці покладають, що довільне тіло — тверде, рідке або газоподібне — складається з величезної кількості структурних елементів, які перебувають у безладному (хаотичному) русі. Такий рух називають тепловим, тому що його інтенсивність залежить від температури. Тепловий рух зумовлює фізичні властивості тіл та процеси, які відбуваються з ними. Явища, зумовлені хаотичним рухом атомів і молекул, називають тепловими. Вони відіграють важливу роль у природі. Наприклад, зі зміною температури змінюються об'єм та густина твердих тіл, рідин і газів.

У середині ХІХ ст. після відкриття закону збереження енергії було створено першу наукову теорію теплових процесів — термодинаміку, де не враховується молекулярна будова тіл. Молекулярна фізика і термодинаміка, розглядаючи властивості тіл і їх перетворення з різних точок зору — мікроскопічної та макроскопічної, взаємно доповнюють одна одну.

Під час вивчення молекулярної фізики ви ознайомитеся з будовою, структурою і властивостями деяких матеріалів, особливостями змін агрегатних станів, розглянете математичні залежності числових параметрів від фізико-механічних властивостей речовин та їх будови.

Вивчати молекулярні явища в різних агрегатних станах слід на основі молекулярно-кінетичних уявлень про гази, рідини і тверді тіла. На межі розподілу речовин відбуваються явища пароутворення, конденсації, поверхневий натяг, підняття рідини в капілярах. Вивчення твердих тіл дає змогу коригувати їх механічні властивості: міцність, пружність тощо.

Досягнення молекулярної фізики ефективно використовуються в інших галузях науки, зокрема у фізичній хімії, молекулярній біології, фізиці твердого тіла, фізико-хімічній механіці тощо. Вона є науковою основою сучасного матеріалознавства, вакуумної технології, холодильної техніки тощо.

§ 22. Сучасні дослідження будови речовини

- ▶ *Із історії вчення про будову речовини*
- ▶ *Маса і розміри молекул*
- ▶ *Кількість речовини*

ІЗ ІСТОРІЇ ВЧЕННЯ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ. Із курсів фізики та хімії ви вже знаєте, що речовиною називають вид матерії, яка характеризується масою та складається з елементарних частинок (електронів, протонів, нейтронів, мезонів тощо). Фізичні та хімічні властивості речовин зумовлюються взаємодією між електронами та атомними ядрами, а також між атомами, молекулами, йонами тощо.

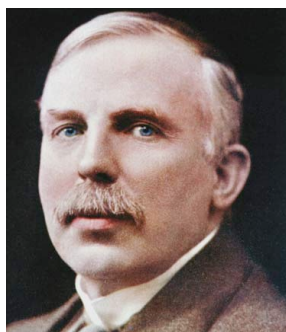
Гадаємо вам відомо, що гіпотеза про існування атомів як найменших неподільних частинок речовини була висунута понад 2500 років тому давньогрецькими ученими Левкіппом і Демокритом. Вони висловили її, аналізуючи причини випаровування і конденсації води, зміни розмірів тіл залежно від ступеня їх нагрятості, перемішування речовин тощо.

На основі уявлень про існування найменших частинок речовини було створено молекулярно-кінетичну теорію.

Молекулярно-кінетичною теорією (МКТ) називають вчення, яке пояснює будову та властивості речовини на основі закономірностей руху і взаємодії частинок, з яких складаються тіла.

Значний внесок у створення основ МКТ зробили у другій половині XIX ст. німецький фізик Р. Клаузіус (1822—1888), російський фізик (студент Києво-Могилянської академії) М.В. Ломоносов (1711—1765), австрійський фізик Л. Больцман (1844—1906), а також учені України: М.П. Авенаріус (1835—1895), М.О. Умов (1846—1915), М.М. Бекетов (1827—1911), М.М. Шіллер (1848—1910), І.П. Пуллой (1845—1918) та інші.

Важливу роль у становленні сучасних наукових уявлень про будову атома та атомного ядра відіграли експериментальні дослідження відомого англійського фізика Е. Резерфорда, про які вам уже відомо з курсу фізики 9-го класу.



Ернест Резерфорд
(1871—1937)

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень, Е. Резерфорд запропонував у 1911 р. ядерну планетарну модель атома (мал. 22.1). Відповідно до неї атом є системою зарядів, у центрі якої розташоване важке позитивне ядро, що має розміри близько 10^{-15} м. В ядрі зосереджено понад 99,95 % маси всього атома. Навколо ядра обертаються електрони, подібно планетам Сонячної системи.

Згідно з розрахунками Е. Резерфорда, лінійний розмір ядра атома в десятки тисяч разів менший за розміри самого атома, що становлять близько 10^{-10} м.

Н. Бор у 1913 р. доповнив планетарну модель атома положеннями (постулатами), що усували її суперечності з класичною фізикою:

— атоми перебувають у певних стаціонарних станах, у яких вони не випромінюють електромагнітні хвилі;

— під час переходу з одного стану в інший атом випромінює квант енергії, що дорівнює різниці енергій стаціонарних станів (мал. 22.2).

Модель атома Резерфорда — Бора використовується й донині, оскільки є безпосереднім підтвердженням експериментальних фактів.

У 1924 р. Е. Шредингер на підставі теорії Л. де Бройля, за якою електрон одночасно виявляє властивості, притаманні частинці та хвилі, математично описав його поведінку в атомі. Так було створено хвильову модель атома.

Отже, завдяки багаторічній наполегливій праці видатних фізиків та хіміків різних країн світу, було створено вчення про будову речовини, в основу якого покладено наукові поняття про атоми та молекули.

Атом — найменша хімічно неподільна, електрично нейтральна частинка матерії, що складається з позитивно зарядженого ядра й негативно заряджених електронів.

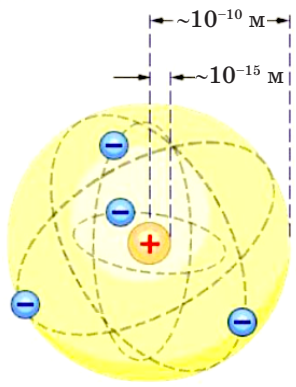
Іон — електронodefіцитний або електрононадлишковий атом чи група атомів.

Молекула — здатна до самостійного існування, електрично нейтральна частинка речовини, що має притаманні їй основні хімічні властивості, які визначаються її складом та будовою.

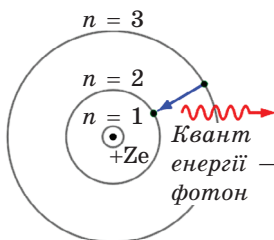
Гіпотеза існування найдрібніших частинок речовини отримала експериментальне підтвер-



Нільс Бор
(1885—1962),
данський фізик-теоретик, лауреат Нобелівської премії з фізики (1922 р.)



Мал. 22.1. Ядерна модель атома Е. Резерфорда



Мал. 22.2. Ядерна планетарна модель атома Бора

дження лише через два тисячоліття (у ХІХ ст.) у працях англійського вченого Джона Дальтона. Він показав, що кожному хімічному елементу відповідає власний тип найдрібніших невидимих атомів, а всі речовини складаються з хімічних сполук атомів.

Вчення про будову речовини набуває розвитку і в наші дні. Зокрема, наразі з'ясовано, що не лише атом є подільним, а й частинки, які його утворюють. Наприклад, нуклони (протони і нейтрони) складаються з кварків та глюонів. Кварки — елементарні частинки і фундаментальні складові матерії. Нині відомо шість сортів кварків. Глюони «склеюють» кварки і рухаються практично вільно всередині нуклона.

МАСА ТА РОЗМІРИ МОЛЕКУЛ. Вивчаючи природничі науки, ви дізналися, що молекули — найменші частинки речовини, які визначають її хімічні властивості. Молекули складаються з атомів, сполучених між собою хімічними зв'язками. Атом — з хімічної точки зору найменша, електричнонейтральна, хімічно неподільна частинка речовини.

Молекули складних речовин утворені із різних атомів, кількість яких може сягати від двох (N_2 , O_2 , H_2 , KCl) до тисячі і більше (полімери). Багатоатомні молекули називають макромолекулами. Якщо різних видів молекул у природі надзвичайно багато, то кількість різних атомів обмежена. Множину атомів, які мають однаковий заряд ядра (кількість протонів Z , тобто однаковий номер у періодичній системі хімічних елементів Д.І. Менделєєва), називають хімічним елементом (Гідроген, Оксиген тощо). На 2010 р. було відомо 118 хімічних елементів: з них 89 виявлено в природі, інші отримано штучно в процесі ядерних реакцій. Усі відомі нині речовини, а їх уже понад 20 000 000, утворені атомами різних хімічних елементів.

У світі молекул, або мікросвіті, ми зустрічаємося з великою кількістю надзвичайно малих частинок. Встановлено, що в 1 см^3 будь-якого газу за нормальних умов (тобто при температурі $0 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 760 мм. рт. ст.) міститься майже $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Величезна кількість молекул в одиниці об'єму свідчить про їх малі розміри і маси. Діаметр більшості молекул неорганічних речовин має порядок (наближено дорівнює) $d \approx 10^{-10} \text{ м}$ і масу $m \approx 10^{-26} \text{ кг}$.

Гігантами є, наприклад, молекули білків. Молекула дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК), носія спадкової інформації живого організму, у випрямленому стані досягає довжини десятків сантиметрів.

Оскільки маси молекул неорганічних речовин надзвичайно малі, то під час обчислень доцільно використовувати не абсолютні, а відносні значення мас. Тому для зручності ввели поняття відносної молекулярної (атомної) маси

$$M_r = \frac{m_o}{\frac{1}{12}m_o(C^{12})},$$

де M_r — відносна молекулярна (A_r — відносна атомна) маса;

m_o — маса атома або молекули речовини;

$\frac{1}{12}m_o(C^{12})$ — маса 1/12 частини маси атома карбону становить $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, її називають атомною одиницею маси (а.о.м.):
 $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Величину $\frac{1}{12}m_o(C^{12})$ використовують для порівняння маси молекули (атома) певної речовини з масою молекули (атома) Карбона, оскільки він є поширеним елементом і на цю величину майже націло діляться маси атомів більшості хімічних елементів.

Відносна молекулярна (атомна) маса не має одиниць вимірювання. З визначенням відносної молекулярної (атомної) маси ви ознайомилися в курсі хімії. Нагадаємо, наприклад, для H_2O : $M_r = 1 \cdot 2 + 16 \cdot 1 = 18$; для Si : $M_r = A_r = 64$.

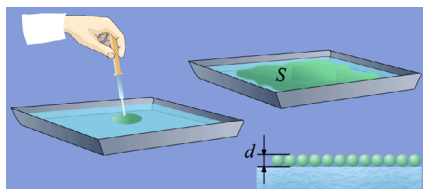
Водночас слід чітко уявляти різницю між відносною молекулярною та масою молекули речовини, розуміючи, що вони рівні чисельно, але мають різні одиниці вимірювання: відносна молекулярна (атомна) маса є безрозмірною величиною; молекулярна маса вимірюється в атомних одиницях маси (а.о.м.).

Абсолютні значення атомних мас різних хімічних елементів лежать у межах 10^{-24} — 10^{-27} кг, а їхні відносні маси, наведені у періодичній таблиці хімічних елементів, — у межах 1—100 а.о.м. Для органічних речовин значення M_r може сягати сотень тисяч. Під час математичних обчислень наведені у цій таблиці відносні атомні маси хімічних елементів ми надалі заокруглюватимемо до найближчого цілого числа.

Цілком логічним постає запитання про те, як можна визначити розміри таких малих частинок, як молекули. Шукаючи відповідь на нього, на початку XX ст. лорд Релей здійснив простий і переконливий дослід, який належить до геніальних дослідів фізики. Припущення Релея базувалося на тому, що розпливаючись на максимальній площі, олива утворює шар товщиною в діаметр однієї молекули. Визначивши площу плівки S за умови максимального розливання краплини олії та знаючи її об'єм V , за відношенням $d = \frac{V}{S}$ можна оцінити розміри молекул (мал. 22.3).

Релей заповнював водою посудину площею $S = 5,27 \cdot 10^3 \text{ см}^2$. У його дослідах маса краплини оливкової олії становила $m = 8 \cdot 10^{-4}$ г. Знаючи її густину $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$, учений визначив об'єм краплини: $V = 8,88 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$ (нагадаємо, що $V = \frac{m}{\rho}$). За результа-

тами експерименту приблизний діаметр молекули маслинової олії становив $d = 1,7 \cdot 10^{-7}$ см, тобто на відстані 1 см можна побудувати ланцюжок із 6 млн таких молекул.



Мал. 22.3. Дослід Релея

Наразі існують точніші методи визначення розмірів молекул різних речовин. Встановлено, наприклад, що лінійні розміри молекули кисню становлять $3 \cdot 10^{-10}$ м, а водню — $2,6 \cdot 10^{-10}$ м.

КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ. Оскільки будь-яке тіло складається із величезної кількості окремих частинок, то в молекулярній фізиці виникла потреба введення відносної величини — кількості речовини (ν), що прямо пропорційна числу частинок, тобто структурних елементів, які містяться в тілі.

Одиницею кількості речовини є моль — одна з основних одиниць Міжнародної системи фізичних одиниць (СІ).

Один моль — така кількість речовини, що містить стільки ж структурних елементів будь-якої речовини, скільки міститься атомів у 12 г ізотопу Карбону (C^{12}).

В 1 молі будь-якої речовини міститься однакова кількість структурних елементів (молекул): $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \left(\frac{1}{\text{моль}} \right)$. Цю кількість називають сталою (числом) Авогадро на честь італійського вченого XIX ст. Її визначають різними фізичними методами.

Кількість молів речовини знаходять за формулою:

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

де N — кількість молекул або атомів (структурних одиниць) у певній масі речовини; m — маса речовини; M — її молярна маса.

Зрозуміло, що з останнього виразу кількість атомів або молекул у тілі певної маси m становить:

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

Маса одного моля структурних одиниць (молекул) речовини називається молярною масою (M).

Молярна маса чисельно дорівнює добутку маси однієї молекули (m_0) на сталу Авогадро (N_A):

$$M = m_0 N_A.$$

Скориставшись періодичною таблицею хімічних елементів, можна визначити молярну масу речовини:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Маси молекул і атомів зі значним ступенем точності визначаються за допомогою спеціального приладу — маспектрографа. Знаючи густину речовини ρ , на основі попередніх тверджень, можна знайти набли-

жене значення діаметра молекули, вважаючи її кулею, $d = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi \rho N_A}}$.

! Головне в цьому параграфі

Молекулярно-кінетичною теорією пояснюються будова і властивості макроскопічних тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично та взаємодіють між собою.

Маси молекул надзвичайно малі, а їх кількість у макроскопічних тілах величезна. Тому ці фізичні величини виражають у відносних одиницях.

Відносною молекулярною (або атомною) масою називають відношення маси молекули (або атома) певної речовини до $1/12$ маси атома Карбону:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_0(C^{12})}.$$

Кількість молекул у молі речовини називають сталою (числом) Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \left(\frac{1}{\text{моль}} \right)$.

Кількістю речовини називають відношення кількості молекул у певному тілі до сталої Авогадро. Одиницею її виміру є моль: $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$.

Молярною масою називають масу речовини, взятої в кількості одного моля: $M = m_0 N_A$, $M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

? Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає основне завдання молекулярної фізики?
2. Чому в молекулярній фізиці використовуються відносні величини для вимірювання маси?
3. Що називають відносною молекулярною масою? Якою формулою виражається це поняття?
4. Що таке кількість речовини? Якою формулою виражається зміст цього поняття? Яка одиниця вимірювання кількості речовини? Дайте її визначення.
5. Що називають сталою Авогадро? Чому вона дорівнює?
6. Що таке молярна маса речовини? Якою формулою виражається зміст цього поняття? Яка одиниця молярної маси?
7. За якою формулою визначають кількість молекул у довільній масі речовини?

Вправа до § 22

- 1 (с). Вкажіть, який із перелічених рухів є броунівським:
 - А** Тепловий рух молекул речовини.
 - Б** Вилітання молекул з поверхні речовини.
 - В** Хаотичний рух частинок, завислих у рідині.
 - Г** Рух порошинки у повітрі.
- 2 (с). Які експериментальні факти найдостовірніше підтверджують існування молекул?
 - А** Можливість механічного дроблення речовини.
 - Б** Падіння крапель води з крана.

- В** Стискання та розширення газів.
Г Деформація тіл.
- 3 (с).** За яким з наведених виразів можна розрахувати масу молекули речовини?
А $\frac{m}{V}$ **Б** $\frac{m}{m_0}$ **В** $\frac{N}{V}$ **Г** $\frac{m}{M}$ **Д** $\frac{M}{N_A}$
- 4 (с).** За яким з наведених виразів можна розрахувати густину речовини?
А $\frac{M}{N_A}$ **Б** $\frac{m}{m_0}$ **В** $\frac{N}{V}$ **Г** $\frac{m}{M}$ **Д** $\frac{m}{V}$
- 5 (с).** На поверхню води впала крапелька гасу і розтікла, утворивши тонку плівку. За допомогою цього досліду можна визначити:
А Швидкість хаотичного руху молекул гасу.
Б Середній розмір молекул гасу.
В Сили взаємодії молекул.
Г Правильної відповіді немає.
- 6 (д).** Визначте, яка кількість молекул міститься у вуглекислому газі (CO_2) масою 1 г?
- 7 (д).** Яка маса 500 молей вуглекислого газу (CO_2)?
- 8 (в).** Під час нікелювання виробу його вкривають шаром нікелю товщиною 15 мкм. Скільки атомів нікелю міститься в покритті, якщо його площа становить 800 см²?

§ 23. Основи молекулярно-кінетичної теорії будови речовини

- ▶ Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини
- ▶ Дифузія
- ▶ Броунівський рух
- ▶ Будова та властивості твердих тіл, рідин і газів

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ РЕЧОВИНИ. Із курсу фізики 8-го класу ви вже знаєте, що в основу молекулярно-кінетичної теорії речовини покладено три положення.

1. Будь-які речовини мають дискретну будову. Вони складаються з молекул або атомів, йонів.

2. Частинки перебувають у стані безперервного хаотичного (непорядкованого) руху, що називається тепловим і загалом є сукупністю поступального, обертального й коливального рухів.

3. Частинки взаємодіють одна з одною і з силами електромагнітної природи. Якщо відстань між молекулами становить два — три діаметри однієї молекули, вони притягуються, а менше одного діаметра — відштовхуються. Сили притягання й відштовхування між молекулами діють постійно і одночасно.

Молекули й атоми мають настільки малі розміри, що їх неможливо побачити за допомогою навіть оптичного мікроскопа. Але здавна вчені мріяли розгледіти молекули. Лише в 1974 р. за допомогою електронного мікроскопа, який має збільшення у мільйони разів, роздивилися великі молекули білкових сполук. Потім, сконструювавши йонний проектор, де на люмінесцентному екрані утворюється збільшене в мільйони разів зображення ультрагострого вістря із вольфраму, уточнили розміщення йонів.

Наразі за допомогою тунельного мікроскопа (мал. 23.1) вдається роздивитися на поверхні твердих тіл навіть окремо взятий домішковий атом, що є переконливим підтвердженням існування молекул, атомів, іонів. На основі дослідження мікроскопічних об'єктів, прогресивним напрямом яких є нанотехнології, можна конструювати штучні речовини.



Мал. 23.1. Тунельний мікроскоп

Нанотехнології — технології розроблення продуктів і компонентів, розмір яких не перевищує 100 нанометрів (один нанометр дорівнює мільярдній частині метра: $1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$).

Молекули різних речовин по-різному взаємодіють одна з одною. Така взаємодія залежить від типу молекул і відстані між ними. Залежно від характеру руху та взаємодії молекул розрізняють такі стани речовини: твердий, рідкий, газоподібний, плазма.

Безперервним хаотичним рухом молекул та майже відсутньою силою притягання пояснюється здатність газів необмежено розширюватися і займати весь наданий їм об'єм. Пружність газів, твердих тіл і рідин, здатність рідин змочувати тверді тіла, процеси фарбування, склеювання, деформації твердих тіл тощо також свідчать про існування сил притягання і відштовхування між молекулами. Довести існування значних сил притягання між атомами або молекулами твердих тіл можна, зокрема, за допомогою досліду з товстою палицею, яку складно зламати.

ДИФУЗІЯ. Переконливим дослідним підтвердженням основних положень МКТ є явище дифузії.

Дифузія (від лат. *diffusio* — розливання) — процес взаємного проникнення молекул або атомів однієї речовини у проміжки поміж молекулами або атомами іншої, що зазвичай зумовлює вирівнювання їх концентрацій в усьому займаному об'ємі.

Причиною дифузії є тепловий рух молекул і наявність проміжків між ними. Явище дифузії відбувається в рідинах, твердих тілах і газах. Наприклад, у газах — це швидке поширення пахоців навіть у спокійному



Мал. 23.2.
Дифузія розчину мідного купоросу у воді

повітрі: аромат парфумів за кілька хвилин поширюється по всій кімнаті; у рідинах — перемішування, наприклад, води і чорнила, води і розчину мідного купоросу (мал. 23.2). Із підвищенням температури тривалість процесу дифузії зростає внаслідок збільшення швидкості руху частинок. Дифундують і молекули (атоми) твердих тіл, але за низьких температур це відбувається досить повільно. У рідинах дифузія протікає значно повільніше, ніж у газах, але швидше, ніж у твердих тілах, що пояснюється відмінністю характеру теплового руху атомів і молекул.

У природі дифузія сприяє живленню рослин із ґрунту. Значна роль дифузії й у живленні організмів тварин і людини. Через стінки шлунка і кишок організм «всмоктує» лише ті розчинені в страві речовини, які потрібні для побудови його клітин. Прикладом дифузії є насичення крові киснем і відведення шкідливих речовин (це явище отримало назву осмосу).

Дифузію, що здійснюється через напівпроникні перетинки, називають осмосом.

Завдяки процесу дифузії відбувається соління огірків. Підтримання однорідного складу атмосферного повітря поблизу поверхні Землі, змішування різнорідних рідин, процес розчинення твердих тіл, зварювання металів як шляхом їх плавлення, так і внаслідок стиснення пояснюються явищем дифузії. Подібні явища доводять істинність основних положень МКТ.

БРОУНІВСЬКИЙ РУХ. Одним із найпереконливіших доказів існування хаотичного теплового руху молекул є броунівський рух, названий на честь англійського ботаніка Р. Броуна (1773—1858).

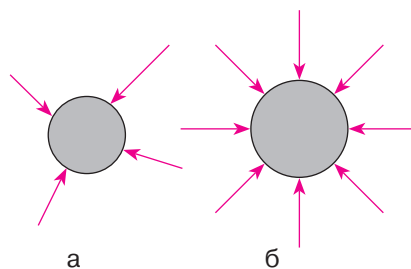
Броунівський рух — тепловий рух частинок, завислих у рідині або газі.

Уперше цей рух було відкрито у 1827 р. під час спостереження спор плавуна у воді. Пізніше Броун спостерігав такий самий хаотичний рух дрібних частинок інших речовин, однак пояснити цього явища він не зміг.

Вивченням броунівського руху займався багато вчених і нарешті було встановлено, що рух завислих частинок, який спостерігався у полі зору оптичного мікроскопа, здійснюється внаслідок руху молекул рідини. Молекули передають частинкам імпульс, а отже, чинять на них тиск. Якщо частинка має незначну площу поверхні, то на один із її боків у будь-яку мить середнє значення тиску може бути більшим, ніж на інший, тому вона здійснює безладний рух в об'ємі рідини.

Головною причиною броунівського руху є некомпенсованість сил, з якими молекули діють на завислу частинку (мал. 23.3, а). Якщо тиск з усіх боків на броунівську частинку однаковий, то вона не здійснює хаотичного руху (мал. 23.3, б).

Безпосередньо спостерігати за рухом частинок, завислих у рідині або газах, можна за умови, якщо їхні розміри не перевищують 10^{-6} м. Броунівські частинки безперервно рухаються незалежно одна від одної. Його інтенсивність тим більша, чим вища температура і менша в'язкість рідини та маса завислих частинок незалежно від їх природи.

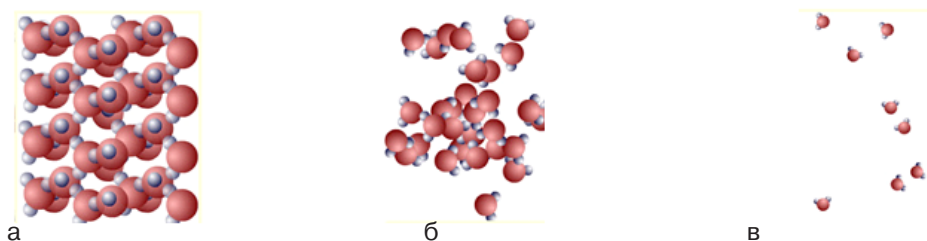


Мал. 23.3. Дія молекул рідини на броунівську частинку:
а — некомпенсована;
б — скомпенсована

БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ, РІДИН І ГАЗІВ. У твердих тілах відстані між молекулами (атомами) досить малі, тому сили взаємодії кожної з них із сусідніми настільки великі, що молекула здійснює незначні коливання відносно певного фіксованого положення рівноваги (мал. 23.4, а). Потенціальна енергія взаємодії молекул значно більша від їх кінетичної енергії, чим і пояснюється властивість твердих тіл зберігати форму та об'єм.

У рідинах сили взаємодії між молекулами слабші, ніж у твердих тілах, і значно сильніші, ніж у газах (мал. 23.4, б). Молекули рідини, коливаючись біля певного положення рівноваги, змінюють його з часом, перескакуючи з одного місця на інше. Вони здійснюють коливальний, поступальний і обертальний рухи. У рідинах відстані між молекулами є дещо більшими, ніж у твердих тілах, проте сили взаємодії молекул є значними. Загалом кінетична енергія молекул рідин приблизно дорівнює їх потенціальній енергії.

У газоподібному стані середня відстань між молекулами набагато більша від розмірів самих молекул, тому сили міжмолекулярних взаємодій суттєво не впливають на їх рух (рис. 23.4, в). Кінетична енергія хаотичного руху молекул (у довільних напрямках і з різною швидкістю) газу значно більша від потенціальної енергії їх взаємодії. Багатоатомні молекули під час поступального здійснюють також обертальний рух.



Мал. 23.4. Особливості розташування молекул однієї тієї ж речовини в різних агрегатних станах

Плазма — частково або повністю іонізований газ. Вона складається з йонів, електронів та молекул (атомів). Плазма — найпоширеніший стан речовини в природі. Сонце і зірки — це гігантські згустки плазми. Вона також існує в космосі у вигляді так званого сонячного вітру та утворює іоносферу Землі тощо. Процесами в навколосемній плазмі зумовлені магнітні бурі та полярне сяйво. З нею ми часто зустрічаємося і в повсякденному житті. Полум'я багаття, сірника, світні стовпи газу в медичних «кварцевих лампах» — все це також приклади плазми.

! Головне в цьому параграфі

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини:

- 1) будь-які речовини мають дискретну будову. Вони складаються із найдрібніших частинок — молекул або атомів, йонів;
- 2) частинки перебувають у стані безперервного хаотичного (непорядкованого) руху, що називається тепловим і загалом є сукупністю поступального, обертального й коливального рухів;
- 3) частинки взаємодіють одна з одною і з силами електромагнітної природи.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке МКТ? Сформулюйте основні положення МКТ.
2. Які спостереження й експерименти підтверджують основні положення МКТ?
3. Атоми і молекули тіла хаотично рухаються. Як це узгоджується з тим, що багато тіл зберігають форму та об'єм?
4. Що таке броунівський рух? Про що він свідчить? Чи є безладний рух порошин у повітрі броунівським?
5. Що називають дифузією? Наведіть приклади дифузії в газах, рідинах і твердих тілах.
6. Опишіть характер руху молекул у газах, рідинах і твердих тілах.
7. Який характер розміщення частинок у газах, рідинах і твердих тілах?

Вправа до § 23

- 1 (с). Розглядаючи під мікроскопом краплинку молока можна побачити на фоні безкольорової рідини маленькі завислі краплинки масла, що перебувають у безперервному хаотичному русі. Чим можна пояснити цей рух? Від чого залежить його інтенсивність?
- 2 (с). Поясніть, чому з підвищенням температури збільшується інтенсивність руху мікрочастинок.
- 3 (с). Поясніть, чому чайна заварка, вміщена в паке-тик, забарвлює всю воду в склянці.
- 4 (с). В якій із склянок з розчинною кавою міститься гаряча вода? Відповідь поясніть.
- 5 (д). Чому броунівський рух дрібніших частинок здійснюється інтенсивніше?
- 6 (д). Поясніть, чому з уламків розбитого скла неможливо скласти цілу склянку, а добре відшліфовані скляні пластини злипаються.



Малюнок до завдання 4.

- 7 (д). У кожну з мензурок дослідник додав однакову кількість мідного купоросу. В яку з них мідний купорос було додано раніше:
- А Розташовану праворуч.
 - Б Час спостереження не впливає на результат.
 - В Мідний купорос додано одночасно.
 - Г Розташовану ліворуч.



Мал.
до завдання 7.

§ 24. Ідеальний газ. Тиск газу. Температура

- ▶ *Ідеальний газ*
- ▶ *Тиск газу в молекулярно-кінетичній теорії*
- ▶ *Температура*

ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. Вивчення агрегатного стану речовини передбачає встановлення зв'язків між різними величинами, що характеризують її властивості, — параметрами. Характеристики молекул газу називають мікроскопічними параметрами. До них належать маса молекул, їхня швидкість і кінетична енергія хаотичного поступального руху. Параметри газу як фізичного тіла називаються макроскопічними. До них належать об'єм, тиск і температура. Отже, одним із головних завдань молекулярно-кінетичної теорії є встановлення зв'язків між макроскопічними і мікроскопічними параметрами газу. З метою його виконання створено модель ідеального газу, в якій передбачається, що об'єм молекул газу надзвичайно малий порівняно з розмірами посудини, в якій він міститься, між ними не діють сили притягання, а під час зіткнень молекул між собою і зі стінками посудини діють лише сили відштовхування. Вважають, що зіткнення молекул здійснюється за законами пружних ударів, між якими вона рухається рівномірно й прямолінійно.

Ідеальний газ — газ, у якому молекули можна вважати матеріальними точками, які майже не взаємодіють між собою.

Отже, моделлю такого газу є сукупність матеріальних точок, які хаотично рухаються і взаємодіють між собою та стінками посудини лише під час безпосереднього абсолютно пружного зіткнення. Молекули газу мають форму куль певної маси й рівномірно розподілені по всьому об'єму посудини, у якій він міститься. Рівномірний розподіл молекул ідеального газу зумовлений їх безперервним хаотичним рухом.

За високих тисків і низьких температур газ не може прийматися за ідеальний. Реальні гази лише за незначних тисків і низьких температур наближені за своїми властивостями до ідеального. Отже, вони набувають властивостей ідеального газу лише під час значного розрідження, коли середня відстань між його молекулами істотно перевищує їх розмір. Поведінка реального газу описується законами, відмінними від законів ідеального.

ТИСК ГАЗУ В МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНІЙ ТЕОРІЇ. Вам вже відомо, що тиск газу на стінки посудини (чи будь-яку іншу поверхню) зумовлено ударами молекул. Тиск газу, здійснюваний на навколишні тіла, — найголовніша відмінність газу від рідин і твердих тіл.

Молекули газу за кімнатної температури рухаються із надзвуковою швидкістю. Стикаючись із будь-якими тілами (стінки посудини, люди, тварини, автомобілі, скелі), молекули передають їм частину свого імпульсу, а отже, діють на тіла з певною (надзвичайно малою) силою. Натомість стінка діє на молекулу з такою ж силою, але протилежно напрямленою. Якщо кількість молекул у посудині незначна, то удари відбуваються із суттєвими (у масштабі мікросвіту) інтервалами часу, що сприймається не як окрема безперервна дія, а як низка послідовних надзвичайно малих дій. Якщо реальна кількість молекул у посудині велика (крім штучно створюваних умов високого вакууму), то удари відбуватимуться безперервно. Нескінченно малі зусилля окремих молекул додаються, і результуюча дія сприймається як постійно діюча сила. Усереднена за часом результуюча сила дії молекул на одиницю площі посудини і є тиском газу.

Оскільки величезна кількість молекул газу рухається хаотично, то в середньому здійснюється однакова кількість ударів у будь-якому напрямку, а отже, тиск на всі стінки посудини має бути однаковим, що відображено в законі Паскаля. У випадку однієї чи кількох молекул поняття тиску взагалі втрачає сенс. Отже, тиск газу — це величина, яка характеризує стан значної кількості молекул, тобто макроскопічний параметр. За одиницю тиску в СІ приймають такий тиск, за якого на 1 м^2 поверхні на неї діє сила в 1 Н . Цю одиницю називають паскалем:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Якщо газ складається із суміші кількох ідеальних газів, то молекули кожного з них ударають об стінку посудини незалежно одна від одної. Відповідно до принципу суперпозиції сил тиски газів, які утворюють суміш, додаються. Тиск, який чинить кожен газ окремо, називається парціальним. Твердження: «Тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, що входять до її складу» вперше сформулював англійський фізик і хімік Д. Дальтон (1766—1844). Так, атмосферний тиск складається із парціальних тисків азоту, кисню та інших газів.

ТЕМПЕРАТУРА. Температура — це фізична величина, про яку ви дізналися з раннього дитинства, як про ступінь нагрітості тіл (холодне, тепле, гаряче), характеристику теплої або холодної в різні пори року погоди, показник стану здоров'я тощо. Побутове поняття температури часто перешкоджає глибокому розумінню її фізичної сутності. Це одна з універсальних фізичних величин, до розуміння сутності якої людство йшло впродовж багатьох віків. Вона є макроскопічним параметром, тому характеризує цілісну сукупність молекул, з яких складається тіло.

Температура — фізична величина, що характеризує тепловий стан системи, й є мірою інтенсивності хаотичного руху молекул в макроскопічному тілі.

У фізиці користуються переважно так званою абсолютною температурою і шкалою Кельвіна. У 1848 р. видатний англійський фізик У. Томсон (лорд Кельвін) (1824—1907) запропонував початок відліку температури здійснювати від точки (температури), при якій припиняється будь-який тепловий рух молекул, тобто прийняти за нуль температуру $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$. Таку шкалу називають абсолютною температурною шкалою або термодинамічною шкалою температур.

Абсолютний нуль температури — температура при якій припиняється тепловий рух молекул. Тиск та об'єм ідеального газу рівні нулю.

Одиницею температури в СІ є кельвін — одна із семи основних одиниць цієї системи. Головною особливістю термодинамічної шкали є відсутність від'ємних значень температури. Перехід від шкали Цельсія до абсолютної температурної шкали здійснюють так (мал. 24.1): $T = t^\circ + 273,15$.

Зверніть увагу, що інтервал температур $\Delta T = \Delta t^\circ$. Отже, для зміни температури $1\text{ }^\circ\text{C} = 1\text{ К}$.

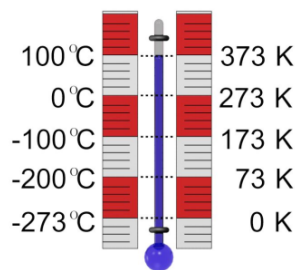
Проте нині вже доведено, що навіть за абсолютного нуля молекулярний рух не припинявся б, оскільки молекули здійснюють ще й коливальні рухи. Досягти абсолютного нуля неможливо — це один із основних законів природи. Неможливо досягти також температури, нижчої за абсолютний нуль. Чим ближче температура охолодженого тіла до абсолютного нуля, тим складніше здійснюється подальше охолодження. Наразі за допомогою сучасних методів вдалося досягти найнижчої температури — $0,0001\text{ К}$.

Температура тіла і швидкість руху його молекул тісно пов'язані між собою. Чим вища температура тіла, тим швидше рухаються молекули, тим більша їхня кінетична енергія.

Австрійський фізик Больцман, спираючись на величезну кількість дослідів, довів, що середня кінетична енергія поступального руху молекул газу лінійно залежить від його температури. Для одноатомного ідеального газу вона набуває вигляду:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT,$$

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



Мал. 24.1. Зв'язок між шкалами температур Цельсія і Кельвіна

Стала Больцмана — це фундаментальна фізична величина, яка чисельно дорівнює зміні кінетичної енергії однієї молекули ідеального газу зі зміною його температури на 1 К.

Незважаючи на те, що висновок про зв'язок температури із середньою кінетичною енергією молекул встановлено для газів за нормальних умов, він справедливий також для рідин та твердих тіл.

! Головне в цьому параграфі

Одним із важливих завдань молекулярно-кінетичної теорії є встановлення зв'язків між макроскопічними (тиск, температура, об'єм) і мікроскопічними (маса молекули, швидкість, кінетична енергія) параметрами.

Ідеальний газ — газ, у якому молекули можна вважати матеріальними точками, які майже не взаємодіють між собою.

Тиск, який чинить кожен газ окремо, називається парціальним.

Тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, що входять до її складу.

Температура як термодинамічна величина характеризує тепловий стан системи, як молекулярно-кінетична — інтенсивність хаотичного руху молекул.

Абсолютна температура (T) — фізична скалярна величина, яка визначається за середньою кінетичною енергією хаотичного поступального руху молекул:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT.$$

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають мікроскопічними та макроскопічними параметрами газу?
2. Що називають ідеальним газом у МКТ?
3. Назвіть умови, за яких газ можна вважати ідеальним.
4. Який механізм виникнення тиску газу з погляду МКТ?
5. Назвіть прилади якими вимірюють тиск газу?
6. У чому полягає суть закону Дальтона?
7. Якою фізичною величиною характеризується стан теплової рівноваги?
8. Поясніть принцип побудови температурних шкал Цельсія і Кельвіна. Встановіть формули, що виражають співвідношення між значеннями температури, вимірюваної за цими шкалами.
9. Температура газу збільшилась від 1 до 2 °С. Чи можна сказати, що середня кінетична енергія його частинок збільшилась вдвічі?

Вправа до § 24

- 1 (с). Як зміниться тиск ідеального газу, якщо при його незмінній концентрації середня кінетична енергія молекул зменшиться у 5 разів? Виберіть правильну відповідь.
 - А Зменшиться у 5 разів.
 - Б Збільшиться у 5 разів.
 - В Залишиться незмінним.
 - Г Збільшиться у 25 разів.
- 2 (с). Повітря в кімнаті складається із суміші газів: водню, кисню, азоту, водяної пари, вуглекислого газу тощо. Який з фізичних параметрів цих газів обов'язково однаковий під час теплової рівноваги?
 - А Тиск.
 - Б Середній квадрат швидкості теплового руху молекул.
 - В Концентрація.
 - Г Середня кінетична енергія молекул.

- 3 (с).** Що таке абсолютний нуль?
А Температура, за якої припинився б тепловий рух молекул.
Б Температура, за якої замерзає вода.
В Характеристика ступеня нагрітості тіла.
Г Сумарна кількість ударів молекул об певну поверхню.
- 4 (д).** Визначте температуру газу, якщо середня кінетична енергія хаотичного руху його молекул становить $5,6 \cdot 10^{-21}$ Дж.
А 270 К **Б** 290 К **В** 300 К **Г** 310 К
- 5 (д).** В одній посудині міститься водень, а в іншій хлор при однаковій температурі і концентрації. Порівняйте тиски p_1 і p_2 цих газів.
А $p_1 > p_2$ **Б** $p_1 < p_2$ **В** $p_1 = p_2$ **Г** $p_1 \approx p_2$
- 6 (д).** При якій температурі середня кінетична енергія руху молекул одноатомного газу буде вдвічі більша, ніж при температурі -3 °С?
- 7 (д).** Визначте середню квадратичну швидкість атомів гелію за нормальних умов, якщо відомо, що маса атома гелію рівна $6,68 \cdot 10^{-27}$ кг?
- 8 (в).** На скільки відсотків збільшиться середня кінетична енергія руху молекул газу при збільшенні його температури від 7 до 35 °С?

§ 25. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу

- ▶ *Середня квадратична швидкість*
- ▶ *Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу*

СЕРЕДНЯ КВАДРАТИЧНА ШВИДКІСТЬ. Як нам уже відомо молекули здійснюють безперервний, хаотичний (тепловий) рух, а це означає, що швидкість руху будь-якої молекули може бути як надзвичайно великою, так і малою. Напрямок руху молекул постійно змінюється під час їх зіткнень одна із одною. Проте середнє значення їхнього модуля швидкості — певна фіксована величина. Щоб її визначити, треба додати значення швидкості всіх молекул і поділити суму на їх кількість. Але надалі нам буде потрібно знати середнє значення не самої швидкості, а квадрата швидкості, оскільки від цієї величини залежить середня кінетична енергія руху молекул, що, як ми незабаром переконаємося, має велике значення в усій молекулярно-кінетичній теорії.

Отже, середній квадрат швидкості¹ дорівнює:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N}$$

де v_1, v_2, \dots, v_n — модулі швидкостей окремих молекул; N — їх кількість.

¹ Надалі середні значення величин ми будемо позначати ризкою над буквеним символом величини.

Середня квадратична швидкість руху молекул (\bar{v}) — це величина, яка визначається коренем квадратним із середнього квадрата швидкості.

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2}.$$

Середня квадратична швидкість є характеристикою хаотичного неупорядкованого руху молекул, тому її ще називають тепловою. Її значення для газів досить великі. Середня квадратична швидкість молекул азоту при $t = 0$ °C приблизно дорівнює 500 м/с, а молекул водню — 1800 м/с.

Коли вперше обчислили ці величини (друга половина XIX ст.), то результат приголомшив багатьох фізиків і вони висловили сумніви щодо істинності молекулярно-кінетичної теорії. Адже відомо, що запахи поширюються доволі повільно: потрібні десятки секунд, щоб пахощі парфумів, розлитих в одному кутку кімнати, досягли іншого. Зрозуміло, що пояснити цей факт можна великою кількістю зіткнень між молекулами.

ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. Використовуючи модель ідеального газу, німецький фізик Рудольф Клаузіус вивів рівняння, у якому встановлюється зв'язок між тиском ідеального газу p , масою молекули m_0 , їх концентрацією n і середнім квадратом швидкості \bar{v}^2 .

Нехай усередині посудини, площа стінки якої S , міститься ідеальний одноатомний газ з молекулами масою m_0 кожна, які хаотично рухаються із швидкостями v_i . Результати експерименту свідчать, що за незмінної температури посудини і газу в ній середнє квадратичне значення швидкості руху молекул газу може бути визначено за формулою:

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N}},$$

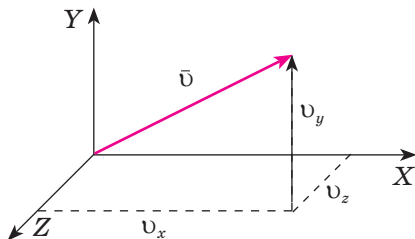
де N — загальна кількість молекул у посудині; \bar{v} — середня квадратична швидкість їх руху.

Оскільки під час руху в просторі молекула може переміщуватися вздовж взаємно перпендикулярних осей OX , OY , OZ у декартовій системі координат, то вектор швидкості \vec{v} має три складові v_x, v_y, v_z (мал. 25.1). Отже, квадрат вектора швидкості пов'язаний з його компонентами таким співвідношенням:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Таке ж співвідношення справедливе і для середнього квадрата швидкості: $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$.

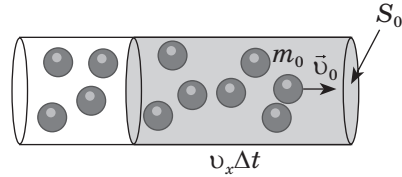
Відповідно до теорії ймовірності рух молекули вздовж однієї вісі має таку ж ймовірність, як і вздовж інших двох (тобто всі три осі є рівноймовірними), тому $\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z$, а отже, $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$, звідки:



Мал. 25.1. Проекції вектора швидкості \vec{v} на осі системи координат

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}.$$

Припустимо, що молекули газу рухаються від однієї стінки до іншої без зіткнень. Це спрощення внаслідок великої кількості молекул (N) і хаотичності їх руху не впливає на точність розрахунків. Під час зіткнення із стінками посудини молекули ідеального газу взаємодіють з ними за законами механіки як абсолютно пружні тіла. Молекула діє на стінку із силою F_2 , що дорівнює за третім законом Ньютона силі F_1 , з якою стінка посудини діє на молекулу і протилежна їй за напрямком. Нехай молекула масою m_0 рухається зі швидкістю \vec{v}_0 в напрямку стінки посудини, площа якої S_0 (мал. 25.2). Відповідно до другого закону Ньютона імпульс сили, з якою молекули тиснуть на стінки ємності: $\vec{F}\Delta t = m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0$. Оскільки взаємодія пружна, тобто модуль швидкості не змінюється, а напрямок руху молекул змінюється на протилежний $\vec{v} = -\vec{v}_0$, то $\vec{F}\Delta t = m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0 = 2m_0\vec{v}$.



Мал. 25.2. Молекули ідеального газу взаємодіють із стінками ємності за законами механіки

Якщо швидкість руху молекули напрямлена під довільним кутом до стінки, то зміна проекції її імпульсу вздовж осі Ox дорівнює: $F\Delta t = 2m_0v_x$. Щоб обчислити імпульс сили, що діє на стінку з боку молекул, необхідно підрахувати кількість їх зіткнень зі стінкою за час Δt . За цей час стінки посудини можуть досягти лише ті молекули, які перебувають в об'ємі $V = Sv_x\Delta t$.

Оскільки в цьому об'ємі відповідно до теорії ймовірності половина молекул рухається до стінки, а інша — від неї, то кількість молекул Z , які вдаряться об стінку за час Δt , дорівнюватиме:

$$Z = \frac{N}{2} = \frac{nV}{2},$$

де $n = \frac{N}{V}$ — концентрація молекул, $[n] = 1 \text{ м}^{-3}$.

Підставивши значення об'єму V у вираз для кількості молекул Z , одержимо рівняння:

$$Z = \frac{nv_x\Delta tS}{2}.$$

Отже внаслідок пружного зіткнення із стінкою ємності, молекула передає їй імпульс:

$$F\Delta t = 2m_0v_xZ; \quad F\Delta t = \frac{2m_0v_x^2n\Delta tS}{2}.$$

Після спрощень сила F , з якою діють молекули на стінку площею S , дорівнює:

$$F = m_0v_x^2nS.$$

Оскільки швидкості молекул різні, то коректніше використовувати середнє значення квадрата проекції швидкості $\overline{v_x^2}$, символ «—» означає середнє значення величини.

Врахувавши, що $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$, а тиск $p = \frac{F}{S}$, одержимо вираз основного рівняння МКТ газів:

$$p = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}.$$

Це рівняння є основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.

Основним рівнянням МКТ газів встановлюється залежність між масою молекули m_0 , середньою квадратичною швидкістю \overline{v} , концентрацію молекул n та тиском, що чинить газ на стінки посудини, в якій міститься.

Це рівняння можна подати і в іншому вигляді, врахувавши, що $nm_0 = \frac{Nm_0}{V} = \frac{m}{V} = \rho$:

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2} \quad \text{або:} \quad p = \frac{\frac{2}{3}nm_0\overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3}n\overline{E_k}$$

Абсолютна температура — фізична скалярна величина, яка визначається середньою кінетичною енергією хаотичного поступального руху молекул.

Оскільки $p = \frac{2}{3}n\overline{E_k}$, де $\overline{E} = \frac{3}{2}kT$, можна записати ще один вираз основного рівняння МКТ газів:

$$p = nkT,$$

де p — тиск газу; n — концентрація молекул ідеального газу; k — стала Больцмана; T — абсолютна температура газу.

Основне рівняння МКТ газів підтверджує той факт, що чим більші маса молекул і їхні швидкості, а також концентрація, тим більший тиск вони чинять на стінки посудини.

В основному рівнянні МКТ газів устанавлюється зв'язок між легко вимірюваними величинами макроскопічного параметра тиску й мікроскопічними параметрами, такими як маса однієї молекули і їх концентрація.

! Головне в цьому параграфі

Середня квадратична швидкість є характеристикою хаотичного неупорядкованого руху молекул газу.

Рівняння, що пов'язує мікроскопічні параметри молекул з макроскопічним тиском, називають основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії газів.

Форми запису основного рівняння МКТ газів:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}; \quad p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}; \quad p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}, \quad p = nkT.$$

? Запитання для самоперевірки

1. Яка швидкість називається середньою квадратичною?
2. Запишіть і поясніть фізичний зміст основного рівняння МКТ.
3. Як записується основне рівняння МКТ через середній квадрат швидкості молекул газу і його густину?
4. Які особливості основного рівняння МКТ і чому його називають основним?

Вправа до § 25

- 1 (с). Укажіть, як зміниться середня кінетична енергія хаотичного руху молекул газу при збільшенні його концентрації в 2 рази, якщо середня квадратична швидкість руху молекул газу залишається незмінною? Виберіть правильну відповідь.
А Зменшиться у 2 рази.
Б Збільшиться у 2 рази.
В Залишиться незмінною.
Г Збільшиться у 4 рази.
- 2 (с). Мікроскопічними параметрами називають величини, які характеризують стан:
А Макроскопічних тіл без урахування їхньої молекулярної будови.
Б Макроскопічних тіл із урахуванням їхньої молекулярної будови.
В Окремих частин макроскопічних тіл із урахуванням їхньої молекулярної будови.
Г Будь-яких фізичних тіл.
- 3 (с). У першій посудині міститься водень, у другій — така сама кількість молекул кисню. Порівняйте тиски газів на стінки посудини, якщо її об'єм і температура газів однакові.
А $p_1 = 16p_2$ **Б** $p_2 = 16p_1$ **В** $p_1 = p_2$ **Г** $p_1 = 4p_2$
- 4 (д). У скільки разів зміниться тиск ідеального газу при зменшенні його об'єму вдвічі і збільшенні середньої кінетичної енергії молекул у 3 рази? Маса газу залишилася незмінною.
А Збільшиться в 3 рази
Б Збільшиться у 6 разів.
В Збільшиться у 1,5 раза.
Г Збільшиться у 2 рази.
- 5 (д). Визначте середню квадратичну швидкість руху молекул газу, що має масу 3 кг і займає об'єм 5 м³ під тиском 100 кПа.
А 600 м/с **Б** 723 м/с **В** 707 м/с **Г** 750 м/с
- 6 (д). У скільки разів зміниться тиск одноатомного газу внаслідок збільшення його об'єму в 3 рази і середньої кінетичної енергії молекул — у 2 рази?
- 7 (в). Суміш газів складається з 50 г молекул азоту і певної кількості молекул вуглекислого газу. Молярна маса суміші становить 35 г/моль. Визначте масу вуглекислого газу в суміші.

§ 26. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроееси

- ▶ Рівняння Менделєєва — Клапейрона
- ▶ Рівняння Клапейрона
- ▶ Ізопроееси

РІВНЯННЯ МЕНДЕЛЄЄВА — КЛАПЕЙРОНА. Стан газу певної маси повністю визначений, якщо відомі його тиск, температура і об'єм. Ці величини називають макроскопічними параметрами стану газу. У природі часто відбуваються процеси, коли одночасно змінюються всі три макроскопічні параметри газу.

Рівняння стану ідеального газу — рівняння, що встановлює зв'язок між його макроскопічними параметрами — p, V, T .

Рівняння стану ідеального газу є узагальненням дослідних фактів. Його можна вивести з основного рівняння МКТ. Відомо, що $p = nkT$. Отже

$p = \frac{N}{V}kT$, звідки: $pV = NkT$. Замінивши кількість молекул виразом

$N = \frac{m}{M}N_A$, одержимо:

$$pV = \frac{m}{M}N_AkT.$$

Добуток відомих вам сталих: Авогадро N_A і Больцмана k є теж сталою величиною, яку називають універсальною (молярною) газовою сталою і позначають літерою R :

$$R = N_Ak.$$

Обчислимо значення універсальної газової сталої:

$$R = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Остаточно записуємо рівняння, яке містить лише макроскопічні характеристики газу і є наслідком основного рівняння МКТ. Його називають рівнянням стану ідеального газу або рівнянням Менделєєва — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT.$$

Рівняння Менделєєва — Клапейрона є загальним рівнянням стану ідеального газу будь-якого хімічного складу і довільної маси m . Єдина величина в ньому, що залежить від виду газу, — це молярна маса M .

Якщо врахувати, що густина газу $\rho = \frac{m}{V}$, то рівняння Менделєєва

— Клапейрона матиме вигляд: $p = \frac{\rho}{M}RT$

РІВНЯННЯ КЛАПЕЙРОНА. Газ постійної маси може перебувати в різних станах із різними параметрами:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R; \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R.$$

Праві частини обох виразів для газу незмінної маси однакові, а отже, можна порівняти й ліві частини:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{або} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}.$$

Рівняння стану ідеального газу у такому вигляді було записане в 1834 р. французьким фізиком Б. П. Клапейроном і отримало назву рівняння Клапейрона (об'єднаного газового закону).

Його фізичний зміст такий:

під час переходу газу незмінної маси з одного стану в інший добуток його тиску на об'єм, поділений на термодинамічну температуру, є величиною сталою.

Рівняння стану дає можливість визначити: один із макроскопічних параметрів (p , V , T), знаючи два інші; зміну макроскопічних параметрів ідеального під час перебігу фізичних процесів у системі; зміну стану системи під час виконання нею роботи або отримання теплоти від навколишніх тіл.

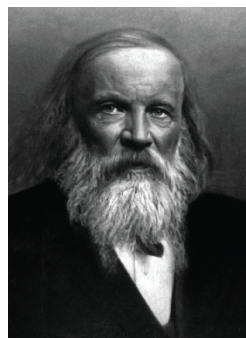
Лише за тиску в сотні атмосфер та за температур зрідження газу (внаслідок значної сили взаємодії молекул) відхилення від результатів обчислень за рівнянням стану ідеального газу стають істотними.

ІЗОПРОЦЕСИ. Процесом у молекулярній фізиці називають перехід системи з одного стану в інший. Процеси, які відбуваються за незмінного значення одного з макроскопічних параметрів певного ідеального газу постійної маси m називають ізопроектими (від грец. *ізо* — рівний, однаковий).

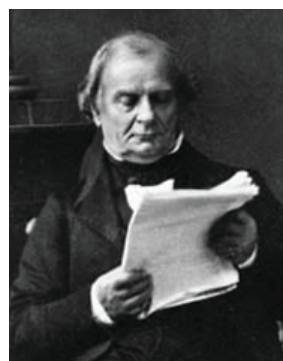
Ізопроекти встановлюють залежності між двома макроскопічними параметрами газу, якщо третій — незмінний.

Кількісні залежності між двома параметрами газу за фіксованого значення третього називають газовим законом.

Оскільки жоден із параметрів газу не може бути строго фіксованим, то будь-який ізопроекти є дещо ідеалізованим.



Дмитро Менделєєв
(1834—1907)



Французький фізик
Бенуа Клапейрон
(1799—1864)

Процес зміни стану термодинамічної системи за постійної температури називають ізотермічним ($m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $T = \text{const}$).

Якщо до ізотермічного процесу застосувати рівняння стану Клапейрона, то, з урахуванням незмінності температури, воно набуде вигляду:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2; \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Такий зв'язок між тиском та об'ємом газу певної маси було експериментально одержано англійським фізиком Р. Бойлем (1662 р.) ще до створення молекулярно-кінетичної теорії і незалежно від нього французьким фізиком Е. Маріоттом (1676 р.).

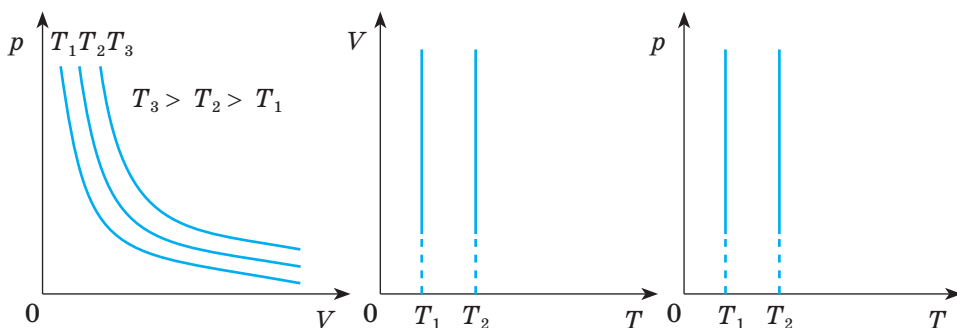
Закон Бойля — Маріотта:

Для ідеального газу певної маси (незмінної кількості речовини) за постійної температури тиск газу добуток тиску на об'єм лишається не змінним.

$$pV = \text{const}; \quad T = \text{const}.$$

Цей закон, як і інші газові закони, є наслідком рівняння стану ідеального газу й істинний для будь-яких газів, які можна вважати ідеальними, а також для їх сумішей (наприклад, повітря). З метою підтримання сталої температури газу потрібно, щоб він міг обмінюватися теплотою з великою системою — термостатом. Роль термостата може відігравати атмосферне повітря, якщо його температура помітно не змінюється впродовж перебігу процесу.

Часто закон Бойля—Маріотта записують у вигляді $p = \frac{\text{const}}{V}$. Графічну залежність між макроскопічними параметрами незмінної маси газу за умови $T = \text{const}$ називають ізотермою. У системі координат pV вона зображається у вигляді гіперболи (порівняйте з



а) б) в)

Мал. 26.1. Графіки ізотерми: а) у координатах pV , б) у координатах VT , в) у координатах pT

$y = \frac{c}{x}$ (мал. 26.1, а). Різним температурам відповідають різні ізотерми — чим вища температура, тим вище на координатній площині pV розташована гіпербола ($T_2 > T_1$). Це корисно знати під час розв'язування графічних задач.

На координатних площинах pT і VT ізотерми зображуються прямими, перпендикулярними до осі температур (мал. 29.1, б, в). Ізотермічним можна вважати процес стиснення повітря компресором або розширення під поршнем насоса газу в результаті відкачування його з посудини (мал. 26.2).

Ізобарним (від грец. *барос* — вага) є процес, який відбувається за постійного тиску ($m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $p = \text{const}$).

Цей закон установив експериментально у 1802 р. французький учений Гей-Люссак. Прикладом ізобарного процесу є нагрівання або охолодження газу в циліндрі під незакріпленим поршнем (мал. 26.3).

Виходячи з рівняння Клапейрона за умови постійного тиску одержимо

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{при } p = \text{const},$$

тобто об'єм газу лінійно залежить від температури за сталого тиску:

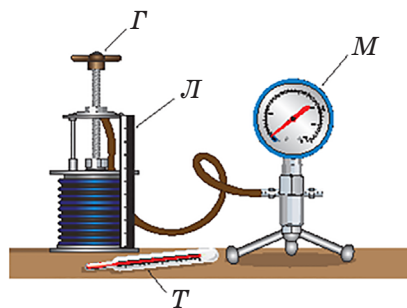
$$V = \text{const} \cdot T.$$

Закон Гей-Люссака:

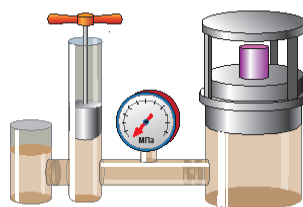
для ідеального газу певної маси за постійного тиску відношення його об'єму до температури залишається незмінним.

$$\frac{V}{T} = \text{const}; \quad p = \text{const}.$$

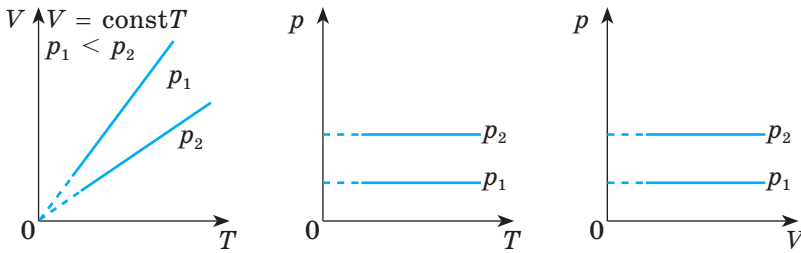
Експериментально перевірити цей закон можна за допомогою пристрою, що є в багатьох кабінетах фізики, — скляної колби із зігнутою трубкою. У горизонтальній частині трубки є крапля рідини, яка відокремлює газ у колбі від атмосферного повітря. Якщо підігріти колбу (можна й руками), то крапля рідини зміститься вправо, тобто об'єм газу, який міститься в колбі, збільшиться, а тиск залишиться рівним атмосферному.



Мал. 26.2. Установа для перевірки закону Бойля — Маріотта

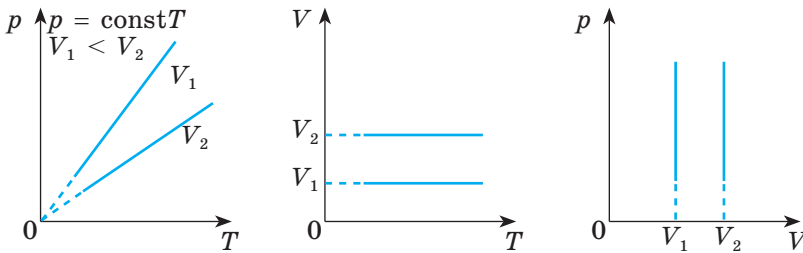


Мал. 26.3. Установа для перевірки закону Гей-Люссака



Мал. 26.4. Графіки ізобари:

а) у координатах VT ; б) у координатах pT ; в) у координатах pV



Мал. 26.5. Графіки ізохорного процесу

а) у координатах pT ; б), в) у координатах VT ; в) у координатах pV

Графік залежності об'єму ідеального газу від температури за постійного тиску є прямою лінією, яку називають ізобарою. На мал. 26.4, а) зображено дві ізобари в координатах VT за різних значень тиску p_1 і p_2 ($p_1 < p_2$). На мал. 26.4 б), та 26.4, в) наведено графіки ізобарного процесу в координатах pT , pV , та VT .

Ізохорним процесом (від грец. *хорема* — місткість) є процес зміни стану термодинамічної системи за постійного об'єму ($m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $V = \text{const}$).

З рівняння стану Клапейрона випливає, закон Шарля:

Для ідеального газу певної маси (незмінної кількості речовини) за постійного об'єму відношення тиску газу до його температури лишається незмінним ($\frac{p}{T} = \text{const}$, $V = \text{const}$).

У 1787 р. цей газовий закон експериментально встановив французький фізик Ж. Шарль.

Графіком залежності тиску від температури за постійного об'єму є пряма лінія, яку називають ізохорою. На мал. 26.5, а) в координатах pT зображено дві ізохори за різних значень об'єму V_1 та V_2 , причому $V_1 < V_2$. На мал. 26.5, б) в наведено графіки процесу в координатах VT і pV .

Газові закони і їх графічні ілюстрації дають змогу вивчати довільні термодинамічні процеси з ідеальним газом.

! Головне в цьому параграфі

Між макроскопічними параметрами газу (тиск, об'єм, температура) існує зв'язок, який визначається рівнянням стану.

Усі досить розріджені гази (ідеальні) підлягають рівнянню стану

Менделєєва — Клапейрона: $pV = \frac{m}{M}RT$.

Рівняння стану Клапейрона (об'єднаного газового закону):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

За допомогою рівняння стану ідеального газу можна досліджувати ізопроееси:

— ізотермічний, закон Бойля-Маріотта: $pV = \text{const}; T = \text{const};$

— ізобарний, закон Гей-Люссака: $\frac{V}{T} = \text{const}; p = \text{const};$

— ізохорний, закон Шарля: $\frac{p}{T} = \text{const}; V = \text{const}.$

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке параметри стану системи? Які величини до них належать?
2. Виведіть рівняння Менделєєва — Клапейрона для довільної маси ідеального газу.
3. Виведіть рівняння Клапейрона. Як воно формулюється?
4. Чому дорівнює універсальна газова стала в СІ?
5. Який процес називають ізотермічним? Яким законом описується цей процес? Як формулюють і записують цей закон?
6. Зобразіть і поясніть графіки ізотермічного процесу.
7. Який процес називають ізобарним? Який закон описує ізобарний процес? Сформулюйте і запишіть цей закон?
8. Зобразіть і поясніть графіки ізобарного процесу.
9. Який процес називають ізохорним? Який закон описує ізохорний процес? Сформулюйте і запишіть цей закон?
10. Зобразіть і поясніть графіки ізохорного процесу.

Вправа до § 26

1 (с). Яка з формул є рівнянням стану ідеального газу?

А $p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2$ **Б** $p = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2$ **В** $pV = \frac{m}{M}RT$ **Г** $p = nkT$ **Д** $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k$

2 (с). Продовжіть твердження: «Під час витікання газу з балона...»:

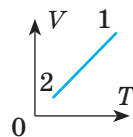
А Зменшується його об'єм.

Б Зменшується його тиск, оскільки зменшується концентрація молекул.

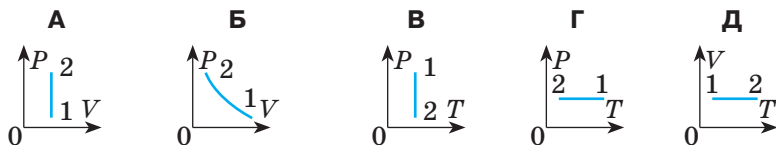
В Збільшується його тиск, оскільки збільшується середня кінетична енергія руху молекул.

Г Зменшується його температура, оскільки зменшується його маса.

- 3 (д).** На малюнку подано ізопроцес (мал. 1).
Вкажіть, на якому з малюнків А—Д зображено цей же ізопроцес, але в інших координатах.



**Малюнок.
До задачі 3**



- 4 (д).** Вкажіть, як змінюється тиск газу під час ізохорного охолодження та чому це відбувається:
А Збільшується, оскільки збільшується концентрація молекул газу.
Б Зменшується, оскільки зменшується середня кінетична енергія молекул газу.
В Збільшується, оскільки зменшується середня кінетична енергія молекул.
Г Збільшується, оскільки зменшується об'єм газу.
- 5 (д).** При якій температурі середня кінетична енергія поступального руху молекул газу дорівнює $6,21 \cdot 10^{-21}$ Дж?
- 6 (д).** Яка кількість речовини міститься в газі, якщо при тиску 200 кПа і температурі 240 К його об'єм дорівнює 40 л?
- 7 (д).** Який тиск повітря, що перебуває в балоні місткістю 20 л при 12°C , якщо маса цього повітря — 2 кг? Молярна маса повітря 0,029 кг/моль.
- 8 (в).** У гумовій кулі міститься 2 л повітря при температурі 20°C і нормальному атмосферному тиску. Який об'єм займе повітря, якщо кулю занурити на 10 м у воду? Температура води становить 4°C .

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №6

Записавши основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу та Менделєєва — Клапейрона, що характеризує різні його стани, можна розв'язати майже будь-яку задачу з молекулярної фізики.

Задачі, в яких обчислюються параметри різних станів ідеального газу, поділяють на два основні класи. До першого — належать такі, в яких розглядаються кілька станів газу постійної маси і до яких можна застосувати об'єднаний газовий закон $\frac{pV}{T} = \text{const}$. Другий клас утворю-

ють задачі, де досліджуються процеси зі змінною масою газу. Під час їх розв'язування використовувати об'єднаний газовий закон неефективно, а потрібно застосовувати рівняння Менделєєва — Клапейрона.

Якщо за умовою задачі досліджуються два стани ідеального газу незмінної маси, то для її розв'язування застосовують такий алгоритм:

— прочитавши умову, потрібно усвідомити, який газ бере участь у тому чи іншому процесі, і переконатися, що під час зміни параметрів стану його маса постійна;

— на схемі, якщо це можливо, позначити різні стани ідеального газу, вказавши параметри p , V , T , що їх характеризують. Визначити з умови задачі, який із трьох параметрів є постійним і за яким газовим законом змінюються інші. Часто одночасно можуть змінюватися всі параметри — p , V і T ;

— записати рівняння об'єднаного газового закону для двох станів. Якщо який-небудь параметр залишається незмінним, воно автоматично трансформується в один із трьох законів: Бойля — Маріотта, Гей-Люссака або Шарля. Якщо ж газ поміщено в циліндричну посудину і його об'єм змінюється лише внаслідок збільшення чи зменшення висоти циліндра, рівняння Клапейрона потрібно записувати у вигляді:

$$\frac{p_1 h_1}{T_1} = \frac{p_2 h_2}{T_2};$$

— виразити параметри p_1 , V_1 , p_2 , V_2 через задані величини. Щоб обчислити тиск, який газ чинить на поверхню рідини, часто доводиться записувати рівняння рівноваги, вибравши за початковий рівень відліку границю, яка відокремлює його від цієї рідини;

— записати допоміжні умови й розв'язати одержану систему рівнянь відносно невідомої величини.

Якщо в задачі розглядаються процеси, пов'язані зі зміною стану двох або трьох газів, відокремлених один від одного рухомими перетинками або які утворюють певну суміш, то зазначені вище дії потрібно виконати для кожного газу окремо. Розв'язуючи задачі з використанням газових законів, рекомендується оперувати лише значенням абсолютної температури, вираженим за шкалою Кельвіна.

Якщо в умові задачі розглядається лише один стан газу і потрібно визначити невідомий параметр або ж надано два його стани, то потрібно встановити, які гази беруть участь у досліджуваних процесах, для кожного з станів скласти рівняння Менделєєва — Клапейрона, визначити додаткові умови та розв'язати одержану систему рівнянь відносно шуканої величини.

У комбінованих задачах, де розглядається механічний рух посудини з газом, рівняння газового стану додають до відомих рівнянь кінематики.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Середня квадратична швидкість молекул деякого газу становить: $\sqrt{v^2} = 450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. При цьому газ створює тиск 50 кПа. Знайти густину газу.

Дано:

$$\sqrt{v^2} = 450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$p = 50 \text{ кПа} = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$\rho = ?$

Розв'язок

Тиск газу визначається за формулою основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \quad (1), \text{ де } n \text{ — число молекул}$$

в одиниці об'єму; m_0 — маса однієї молекули.

Відомо, що величини n і m_0 пов'язані між собою співвідношенням:

$$n = \frac{1}{V} = \frac{\rho}{m_0}. \text{ Тоді рівняння (1) можна записати так: } p = \frac{2}{3} \frac{\rho}{m_0} \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{\rho \overline{v^2}}{3}.$$

$$\text{Звідки знаходимо } \rho = \frac{3p}{\overline{v^2}} = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ Па}}{450 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 450 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 0,74 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\text{Відповідь: } \rho = 0,74 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Задача 2. Скільки молекул повітря міститься у кімнаті об'ємом 240 м^3 за температури $15 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 10^5 Па ?

Дано:

$$V_1 = 240 \text{ м}^3$$

$$T_1 = 288 \text{ К}$$

$$p_1 = 10^5 \text{ Па}$$

$$T_0 = 273 \text{ К}$$

$$p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$$

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$$

$$N - ?$$

Розв'язок

Щоб використати об'єднаний газовий закон порівняємо стани маси повітря за заданих (p_1, V_1, T_1) і нормальних (p_0, V_0, T_0) умов. Тоді $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$

(1). Оскільки об'єм повітря за нормальних умов дорівнює $V_0 = \frac{m}{\rho_0}$ (ρ_0 — густина повітря за нормальних умов), рівняння (1) матиме вигляд

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_0 m}{T_0 \rho_0}, \text{ звідки:}$$

$$m = \frac{p_1 V_1 T_0 \rho_0}{T_1 p_0}.$$

Знайдемо, скільки молей речовини міститься в цій масі повітря: $\gamma = \frac{m}{M} = \frac{p_1 V_1 T_0 \rho_0}{T_1 p_0 M}$. Оскільки 1 моль будь-якого газу містить число молекул, дорівнює постійній Авогадро N_A , то

$$N = \gamma N_A = \frac{p_1 V_1 T_0 \rho_0}{T_1 p_0 M} N_A; N = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 240 \text{ м}^3 \cdot 273 \text{ К} \cdot 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{288 \text{ К} \cdot 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \approx 6 \cdot 10^{27}.$$

$$\text{Відповідь: } N \approx 6 \cdot 10^{27}.$$

Задача 3. Посередині відкачаного і запаяного з обох кінців капіляра, розташованого горизонтально, знаходиться стовпчик ртуті довжиною 20 см . Якщо капіляр поставити вертикально, то стовпчик переміститься на 10 см . До якого тиску було відкачано капіляр? Його довжина — 1 м .

Дано:
 $l = 20\text{см}$
 $\Delta l = 10\text{см}$
 $L = 1\text{м}$

 $p_0 = ?$

Розв'язок

Об'єм повітря з кожної сторони від стовпчика ртуті при горизонтальному положенні капіляра (мал. 1) становить: $V_0 = Sh$, де S — площа його поперечного перерізу, $h = \frac{L-l}{2} = 0,4\text{м}$. Тиск у цьому положенні дорівнює p_0 . Якщо капіляр розташовано

вертикально, то об'єм повітря в його верхній частині рівний $V_1 = S(h + \Delta l)$, а тиск — p_1 .

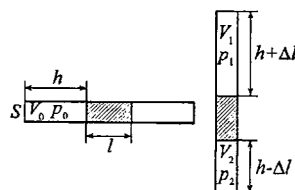
Оскільки $T = \text{const}$, то за законом Бойля — Маріотта $V_0 p_0 = V_1 p_1$ або

$$h p_0 = p_1 (h + \Delta l) \quad (1).$$

Тиск p_2 у нижній частині капіляра складається з тиску повітря p_1 і тиску стовпчика ртуті p . Тоді для нижньої частини капіляра $h p_0 = (p_1 + p)(h - \Delta l)$ (2). Розв'язуючи систему рівнянь

(1) і (2), знайдемо $p_0 = \frac{p(h - \Delta l)(h + \Delta l)}{2h\Delta l}$. За умовою задачі $p = \rho_p g h_p = 200\text{ мм рт. ст.} = 26,6\text{ кПа}$. Тоді обчислюємо: $p_0 = 50\text{ кПа}$.

Відповідь: $p_0 = 50\text{ кПа}$.



Мал. 1. До задачі 3

Задача 4. З метою занурення і спливання підводного човна використовуються два сполучених між собою резервуари. У зануреному стані один із них ємкістю V заповнений водою, а інший ємкістю V_1 — стисненим повітрям. Яким має бути мінімальний тиск повітря, щоб під час підйому човна з глибини H воно повністю витіснило б воду з баластної камери? Атмосферний тиск — нормальний, зміною температури повітря під час розширення знехтувати.

Дано:
 V, V_1, p_a, ρ

 $p_1 = ?$

Розв'язок

Якщо з'єднати резервуари між собою, то стиснене повітря, що міститься в другому резервуарі, буде розширюватися і витіснить воду з баластної камери назвоні.

Оскільки маса і температура стисненого повітря не змінюються, то збільшення його об'єму приведе до зниження тиску. Враховуючи вказані вище умови, під час розв'язування задачі використовуємо закон Бойля — Маріотта.

Нехай p_1 і V_1 — тиск і об'єм стиснутого повітря до розширення, p_2 і V_2 — коли воно, витіснивши воду, займе обидва резервуари. Тоді: $p_1 V_1 = p_2 V_2$. Щоб витіснити воду з баластної камери, повітря має перебувати під тиском, більшим або рівним гідростатичному на глибині H , тобто: $p_2 = p_a + \rho g H$, де ρ — густина морської води. Обчислюємо об'єм $V_2 = V_1 + V$.

Підставляючи вирази p_2 і V_2 у формулу закону Бойля — Маріотта, одержимо таке рівняння газового стану: $p_1 V_1 = (p_a + \rho g H)(V_1 + V)$. Звідки початковий тиск у резервуарі із стисненим повітрям має дорівнювати:

$$p_1 = \frac{V_1 + V}{V_1} (p_a + \rho g H).$$

Відповідь: $p_1 = \frac{V_1 + V}{V_1} (p_a + \rho g H).$

Задача 5. Накреслити ізотерми 0,5 г водню для температур: а) 0 °С; б) 100 °С.

Дано:

$$m = 0,5 \text{ г} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$T_1 = 273 \text{ К}$$

$$T_2 = 373 \text{ К}$$

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$p(V)$ – ?

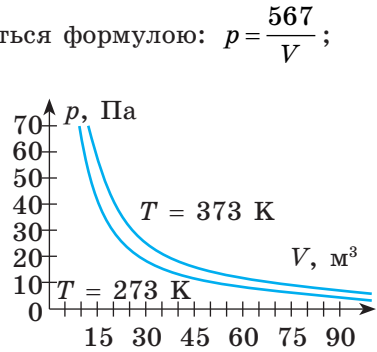
б) аналогічно: $pV = \frac{m}{M} RT_2 = 775 \text{ Дж}.$

Залежність тиску від об'єму виражається формулою: $p = \frac{775}{V}.$

Тоді ізотерми мають вигляд, як на мал. 2.

Розв'язок

а) із рівняння Менделєєва — Клапейрона знаходимо $pV = \frac{m}{M} RT_1 = 567 \text{ Дж}.$ Залежність тиску від об'єму виражається формулою: $p = \frac{567}{V};$



Мал. 2. Ізотерми 0,5 г водню

Задача 6. На малюнку в координатах pV зображено замкнутий газовий процес (цикл) (мал. 3). Побудувати цей цикл у координатах VT і pT .

Розв'язок

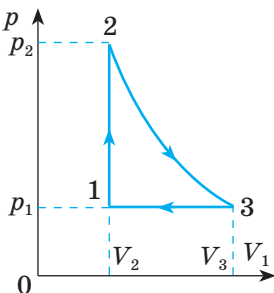
Проаналізуємо процеси, які відбуваються з газом.

Перехід зі стану 1 в стан 2 відповідає ізохорному процесу, тиск збільшується від p_1 до p_2 . зрозуміло, що температура також збільшується.

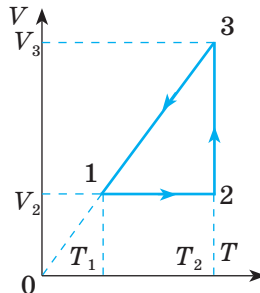
Перехід зі стану 2 у стан 3 — ізотермічне розширення газу від V_2 до V_3 , тиск при цьому зменшується від p_2 до p_1 . Перехід зі стану 3 в стан 1 відповідає ізобарному стисканню від V_3 до V_2 , причому $T_1 < T_3$.

Побудуємо цей цикл у координатах VT (мал. 4).

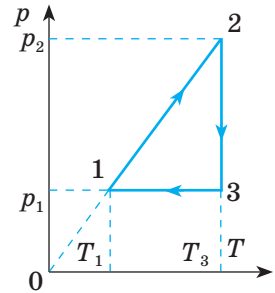
Лінія 1—2 зображає ізохорний процес, причому температура зростає від T_1 до T_2 . Лінія 2—3 зображує ізотермічне розширення від V_2 до V_3 .



Мал. 3



Мал. 4



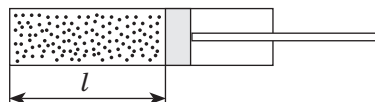
Мал. 5

Лінія 3—1 — ізобарний процес. (Продовження цієї лінії повинне пройти через початок координат!)

На мал. 5 показано цей процес у координатах pT .

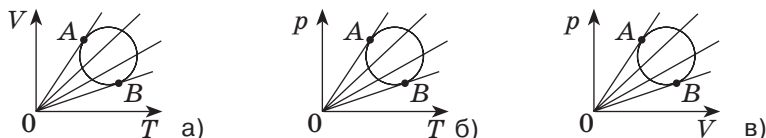
Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (с). Знайдіть масу однієї молекули водню.
- 2 (с). Скільки молекул води міститься в краплі масою 0,02 г?
- 3 (с). Визначте середню квадратичну швидкість молекул кисню за температури 20 °С. За якої температури вона дорівнюватиме 500 м/с?
- 4 (с). Визначте середню кінетичну енергію цього газу за температур -273 °С і 1000 °С.
- 5 (с). Азот масою 2 г під тиском 0,2 МПа займає об'єм 820 см³. Яка його температура?
- 6 (с). Балон об'ємом 12 л заповнено азотом під тиском 8,1 МПа за температури 17 °С. Яка маса азоту міститься в балоні?
- 7 (с). Накресліть графіки залежності тиску від об'єму для: а) ізотермічного; б) ізобарного та в) ізохорного процесів.
- 8 (д). Об'єм кульки повітря під час спливання її із дна озера на поверхню збільшився в три рази. Яка глибина озера?
- 9 (д). У закупореній посудині ємкістю 1 л міститься 12 кг кисню. Знайдіть його тиск за температури 15 °С.
- 10 (д). Кисень масою 10 г міститься в балоні під тиском 0,303 МПа і за температури 10 °С. Після нагрівання за постійного тиску він зайняв об'єм 10 л. Знайдіть початковий об'єм і кінцеву температуру газу.
- 11 (д). Із балона зі стисненим воднем ємкістю 10 л внаслідок поломки вентиля витікає газ. За температури 7 °С манометр фіксує тиск 5 МПа. Його показники залишаються незмінними і за температури 17 °С. Визначте масу газу, що витік з балона.
- 12 (д). В озері на глибині 100 м за температури 8 °С плаває гумова тонкостінна повітряна куля масою 40 г. Визначте масу повітря в ній, якщо атмосферний тиск становить 99,7 кПа.
- 13 (д). У балонах об'ємами 2 і 6 л міститься однорідний газ під тиском і відповідно. Який тиск встановиться в балонах після їх з'єднання за однакової температури.
- 14 (д). Відкриту з обох кінців скляну трубку довжиною 1 м до половини занурюють у ртуть. Потім закривають верхній кінець трубки і виймають з ртуті. Обчисліть висоту ртутного стовпчика, який залишиться в ній. Атмосферний тиск становить 750 мм рт. ст.
- 15 (д). Знайдіть густину водню за температури 10 °С і тиску 97,3 кПа.
- 16 (д). Газ масою 12 г займає об'єм 4 л за температури 7 °С. Після ізобарного нагрівання його густина становить 0,6 кг/м³. До якої температури нагріто газ?
- 17 (д). Ідеальний газ зазнає спочатку ізохорного охолодження, а потім ізотермічного стиснення. Зобразіть ці процеси в координатах pT , VT , pV за умови, що $p_1 = p_3$.
- 18 (д). При збільшенні тиску в 1,5 рази об'єм газу зменшився на 30 мл. Визначте його початковий об'єм.
- 19 (д). У скільки разів зміниться тиск повітря в циліндрі (мал. 6), якщо поршень перемістити на $l/3$: а) ліворуч; б) праворуч?



Мал. 6

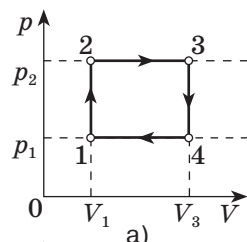
- 20 (д).** Площа поршня (див. мал. 6) дорівнює 24 см^2 , об'єм повітря в циліндрі 240 см^3 , а тиск дорівнює атмосферному (100 кПа). Яку силу необхідно прикласти, щоб утримувати поршень після його переміщення на 2 см : а) ліворуч; б) праворуч?
- 21 (д).** Порівняйте параметри в точках A і B (мал. 7): а) тиск; б) об'єм; в) температуру.



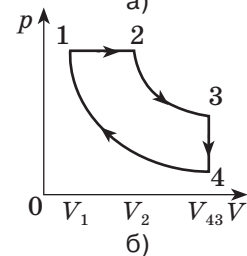
Мал. 7

- 22 (д).** У кімнаті об'ємом 60 м^3 випарували краплину парфумів масою $0,1 \text{ мг}$. Скільки молекул ароматичної речовини потрапляє в легені людини під час кожного подиху? Об'єм повітря, що вдихає людина під час одного подиху, 1 дм^3 . Молярна маса парфумів 1 кг/моль .
- 23 (д).** У балоні міститься газ при температурі 15° C . У скільки разів зменшиться тиск газу, якщо 40% його вийде з балона, а температура при цьому зменшиться на 8° C ?
- 24 (в).** Кристали кухонної солі являють собою кубічну систему, в якій по черзі розміщені іони натрію та хлору. Густина солі становить 2200 кг/м^3 . Чому дорівнює відстань між центрами найближчих іонів?
- 25 (в).** Об'єм повітря в кімнаті становить 100 м^3 . Яка його маса вийшла з неї під час підвищення температури від 10 до 25° C , якщо атмосферний тиск дорівнює 102 кПа .

- 26 (в).** Проаналізуйте зміну макроскопічних параметрів газу в кожному з ізопроесів (мал. 8) та зобразіть цикли в $p(T)$ та $V(T)$ координатах.
- 27 (в).** Пляшку наповнили газом і щільно закрили корком, що має переріз $2,5 \text{ см}^2$. До якої температури слід нагріти газ, щоб корок вилетів із пляшки, якщо сила тертя дорівнює 10 Н ? Початковий тиск газу в пляшці дорівнює атмосферному 100 кПа , а температура -7° C .



- 28 (в).** Тонку циліндричну склянку масою 50 г ставлять догори дном на поверхню води і вертикально занурюють у неї. Висота склянки — 10 см , а площа дна — 20 см^2 . На яку мінімальну глибину треба опустити склянку, щоб вона почала тонути? Атмосферний тиск становить 100 кПа , тиском парів води у склянці і товщиною її стінок — знехтувати.



Мал. 8

- 29 (в).** Компресор забирає з повітря щосекунди 3 л повітря, що надходять до балона ємністю 45 л . Через скільки часу тиск в балоні буде перевищувати атмосферний у 9 разів? Початковий тиск у балоні дорівнює атмосферному.
- 30 (в).** Початковий тиск у посудині дорівнює 100 кПа . Яким стане тиск у цій посудині після 5 ходів поршнево відкачуального насоса? Об'єм робочої камери насоса в 10 разів менший за об'єм посудини.

ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

У молекулярній фізиці та термодинаміці є багато напрямів та нерозв'язаних проблем, до вирішення яких ви можете долучитися, виконуючи навчальні проекти. Пропонуємо вам тематику проектів, результати яких можуть стати основою для подальших досліджень, а можливо й практичних рішень.

Вітчизняні та зарубіжні фізики, які зробили вагомий внесок у розвиток учення про теплоту.

Сучасні знання про будову речовини у розвитку техніки та технологій.

Як виміряти температуру Сонця та зір.

Значення вологості повітря для життєдіяльності людини.

Капілярні явища в життєдіяльності біосфери.

Механічні напруги в живих організмах.

Рідкі кристали та їх використання.

Полімери та наноматеріали в сучасних технологіях.

Теплові насоси як перспективні теплові машини.

Вирішення екологічних проблем використання теплових машин.

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№6)

1 (п). Який із наведених нижче фактів або явищ є найбільш наочним дослідним підтвердженням руху молекул?

А Існування твердих тіл.

Б Виникнення сил пружності у випадку деформації твердих тіл.

В Броунівський рух.

Г Спостереження атомів і молекул за допомогою оптичного мікроскопа.

2 (п). Установіть відповідність між фізичними величинами, та характеристиками, від яких вони залежать:

1 Середня кінетична енергія **А** Залежить від температури га-
одноатомного газу **зу** та маси молекул

2 Тиск ідеального газу **Б** Залежить лише від об'єму да-
ної маси газу

3 Середня квадратична швид-
кість молекул газу **В** Залежить тільки від темпера-
тури

4 Концентрація молекул газу **Г** Залежить тільки від маси мо-
лекул

Д Залежить від температури та
об'єму

3 (п). Установіть відповідність між газовим законом та його математичним виразом:

1 Закон Бойля — Маріотта

2 Закон Гей-Люссака

3 Закон Клапейрона

4 Закон Шарля

$$\mathbf{A} \quad pV = \frac{m}{M}RT$$

$$\mathbf{Г} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\mathbf{Б} \quad p_1V_1 = p_2V_2$$

$$\mathbf{Д} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$\mathbf{В} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

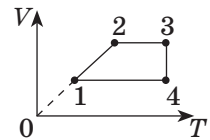
4 (п). Середня квадратична швидкість руху молекул ідеального газу зменшилась у 2 рази, а концентрація не змінилась. Укажіть правильне твердження.

- А** Тиск газу зменшився більше ніж у 3 рази.
- Б** Середня кінетична енергія молекул газу зменшилась у 2 рази.
- В** Абсолютна температура газу не змінилась.
- Г** Тиск газу не змінився.

5 (с). У двох посудинах за однакової температури містяться вуглекислий газ CO_2 і кисень O_2 . Гази можна вважати ідеальними. Укажіть правильне твердження.

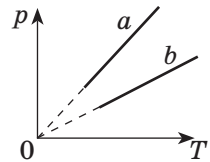
- А** Середні квадратичні швидкості руху молекул пов'язані співвідношенням $\bar{v}_{\text{CO}_2} > \bar{v}_{\text{O}_2}$.
- Б** Середні квадратичні швидкості руху молекул пов'язані співвідношенням $\bar{v}_{\text{CO}_2} < \bar{v}_{\text{O}_2}$.
- В** Середні кінетичні енергії молекул пов'язані співвідношенням $\bar{E}_{\text{CO}_2} > \bar{E}_{\text{O}_2}$.
- Г** Середні кінетичні енергії молекул пов'язані співвідношенням $\bar{E}_{\text{CO}_2} < \bar{E}_{\text{O}_2}$.

6 (с). На малюнку подано графік залежності об'єму певної маси ідеального газу від температури. Укажіть правильне твердження.



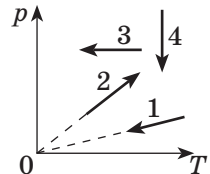
- А** Ділянка 1—2 графіка відповідає ізохорному процесові.
- Б** Ділянка 2—3 графіка відповідає ізобарному процесові.
- В** Ділянка 3—4 графіка відповідає ізотермічному процесові.
- Г** Ділянка 4—1 графіка відповідає ізобарному процесові.

7 (с). На рисунку зображено графік, на якому подано дві ізохори для двох ідеальних газів. Укажіть правильне твердження.



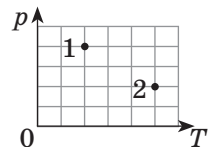
- А** Якщо $m_a = m_b$ і гази однакові, то $V_a > V_b$.
- Б** Якщо $V_a = V_b$ і гази однакові, то $m_a < m_b$.
- В** Якщо $T_a = T_b$ і $V_a = V_b$, то $M_a > M_b$.
- Г** Якщо $V_a = V_b$ і гази однакові, то $m_a > m_b$.

8 (с). На малюнку в координатах p, T зображені графіки процесів, що відбуваються з ідеальним газом постійної маси. Який із графіків відповідає ізохорному охолодженню?



- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| А | Б | В | Г |
| Графік 1 | Графік 2 | Графік 3 | Графік 4 |

9 (с). Визначте співвідношення абсолютних температур T_1 і T_2 повітря тієї самої маси в стани 1 і 2 (малюнок).



- | | | | |
|------------|------------|-------------|------------|
| А | Б | В | Г |
| $T = 0,8T$ | $T = 0,8T$ | $T = 1,25T$ | $T = 1,5T$ |

10 (д). У товстостінному металевому балоні міститься кисень масою 16 г під тиском 10^6 Па. Він займає об'єм. Газ можна вважати ідеальним. Укажіть правильне твердження.

А Температура кисню менше 300 К.

Б Середня квадратична швидкість руху молекул кисню більше 500 м/с.

В Якщо відбудеться витікання кисню, то об'єм газу зменшиться.

Г Якщо відбудеться витікання кисню, то тиск газу не зміниться.

11 (д). Азот міститься в балоні об'ємом 50 л під тиском 15 атм і за температури 27 °С. Скільки молекул азоту міститься в балоні? Вважайте, що 1 атм становить 10^5 Па.

А	Б	В	Г
$6,0 \cdot 10^{23}$	$1,9 \cdot 10^{23}$	$1,8 \cdot 10^{27}$	$1,8 \cdot 10^{25}$
молекул	молекул	молекул	молекул

12 (д). Яка маса молекули Оксигену? ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹)?

А	Б	В	Г
$16 \cdot 10^{-23}$ кг	$32 \cdot 10^{-23}$ кг	$2,7 \cdot 10^{-26}$ кг	$5,3 \cdot 10^{-26}$ кг

13 (д). Визначте об'єм алюмінієвого циліндра, який містить $3 \cdot 10^{24}$ атомів. Стала Авогадро дорівнює $6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; молярна маса та густина алюмінію становлять відповідно $2,7 \cdot 10^{-2}$ кг/моль і 2700 кг/м³.

А	Б	В	Г
5 см ³	15 см ³	50 см ³	486 см ³

14 (д). Яким має бути найменший об'єм балона, що містить 6,4 кг кисню, якщо його стінки при температурі 20 °С витримують тиск 15,7 МПа?

15 (д). Визначте густину суміші 4 г водню й 32 г кисню за температури 7 °С і тиску 93 кПа.

16 (д). Газ при тиску 0,2 МПа і температурі 15 °С має об'єм 5 л. Чому дорівнює об'єм газу цієї маси за нормальних умов?

17 (в). Електричну лампу занурили у воду на глибину 1 м. Після того як відламали цоколь лампи, у її порожнину увійшло 448 г води. Визначте початковий тиск повітря в ній. Ємність балона лампи дорівнює 0,5 л. Атмосферний тиск повітря — 10^5 Па.

18 (в). Суміш газу складається з 30 г азоту і деякої кількості вуглекислого газу. Молярна маса суміші дорівнює $32 \cdot 10^{-3}$ моль. Знайдіть масу вуглекислого газу в ній.

19 (в). Повітряна куля наповнена гелієм. Визначте її радіус, щоб куля могла піднятися у повітря, якщо 1 м^2 її оболонки має масу 50 г. Температура повітря 27 °С, а тиск 10^5 Па.

20 (в). У циліндрі під поршнем площею 100 см² і масою 50 кг міститься повітря при температурі 7 °С. Поршень розташований на висоті 60 см від дна циліндра. Повітря в циліндрі нагрівають до 47 °С, а на поршень кладуть вантаж масою 100 кг. Визначте, на скільки і в якому напрямку (догори чи донизу) переміститься поршень? Атмосферний тиск становить 100 кПа. Тертям поршня об стіни циліндру знехтувати.

§ 27. Випаровування. Властивості насиченої та ненасиченої пари

- ▶ *Випаровування*
- ▶ *Конденсація*
- ▶ *Насичена і ненасичена пара*

ВИПАРОВУВАННЯ. Молекули рідини перебувають у безперервному хаотичному русі. Деякі з них, потрапляючи на її поверхню, можуть залишати рідину і переміщатися у простір над нею. Сукупність молекул над поверхнею рідини утворює пару.

Явище переходу рідини в пару називають пароутворенням.

Пароутворення здійснюється двома способами — випаровуванням і кипінням.

Випаровування — пароутворення, що здійснюється за будь-якої температури з вільної поверхні рідини.

Оскільки з рідини під час випаровування вилітають найшвидші молекули, то середня швидкість руху тих, що залишилися, зменшується. Процес випаровування рідини супроводжується поглинанням енергії. Відповідно, під час випаровування температура рідини знижується.

Випаровування має велике значення в житті людини і тварин. Його ускладнення порушує процес охолодження тіла і може призвести до перегрівання. Після купання поверхня тіла людини охолоджується через випаровування води зі шкіри (при цьому відчувається прохолода, і повітря здається холоднішим, ніж вода).

Завдяки тому, що 2/3 поверхні Землі вкрито водоймами та постійно відбуваються процеси випаровування, підтримується тепловий баланс нашої планети.

Харчові продукти перевозять спеціальними транспортними засобами, обладнаними холодильними пристроями, в роботі яких використовується випаровування рідкого аміаку або двоокису вуглецю.

У місцевостях із жарким кліматом воду намагаються зберігати у пористих глиняних посудинах. Вода, просочуючись крізь пори такої посудини, випаровується, і в результаті цього посудина та вода в ній залишаються прохолодними.

Інтенсивність випаровування залежить від: площі відкритої поверхні рідини (чим більша поверхня, тим більша кількість молекул вилітає з неї), температури (із підвищенням температури процес випаровування відбувається інтенсивніше) та зовнішніх умов. Наприклад, вам відомо, що у вітряну суху погоду мокра білизна сохне значно швидше ніж у безвітряну погоду після дощу. Швидкість випаровування залежить також від природи речовини, що випаровується. Зокрема, вода випаровується швидше за олію, але спирт — швидше за воду. Це пояснюється різними силами взаємодії між молекулами названих речовин.

Досвід доводить, що випаровуватися можуть і тверді тіла. Наприклад, лід, який утворився на калюжі поступово зникає. Процес випаровування твердих речовин називають сублимацією.

КОНДЕНСАЦІЯ. У процесі хаотичного руху деякі молекули, що містяться у парі, можуть повернутись у рідину — відбувається конденсація.

Процес переходу молекул з пари в рідину називають конденсацією.

Конденсацію водяної пари ви можете спостерігати під час її охолодження. Наприклад, улітку, коли надвечір повітря стає прохолодним, водяна пара, що міститься у ньому конденсується, утворюючи краплинки роси на рослинах, а над поверхнею озера можемо спостерігати як стелиться туман — маленькі краплинки води. Над поверхнею води, що кипить, скажімо, в чайнику, також утворюється туман. Водяна ж пара, що міститься в повітрі, — невидима.

Конденсація пари супроводжується виділенням енергії. Цим пояснюється той факт, що одразу після дощу стає дещо тепліше.

НАСИЧЕНА ТА НЕНАСИЧЕНА ПАРА. Процес пароутворення відбувається одночасно з процесом конденсації. Деякі молекули залишають поверхню рідини, інші повертаються. Один із цих процесів може переважати над іншим. Наприклад, якщо залишити склянку з водою на столі, то через деякий час рідина повністю перетвориться на пару. У цьому випадку процес пароутворення переважає над конденсацією. Якщо ж ємкість буде закритою, то рідина в ній зберігатиметься доволі довго — процеси пароутворення та конденсації зрівноважені. Такий стан називають динамічною рівновагою.

Динамічною рівновагою називають стан, за якого кількість молекул, що переходять з рідини в пару, дорівнює кількості молекул, що переходять з пари в рідину.

Накриємо посудину, що містить рідину і пару. Через деякий час між рідиною і парою настане стан динамічної рівноваги. Кількість молекул, що переходять із рідини в пару за певний час, дорівнюватиме кількості молекул, які переходять із пари в рідину (конденсат) за той самий час.

Отже, під час динамічної рівноваги у певному об'ємі за певної температури не може бути вміщено більшої кількості пари, ніж є.

Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають насиченою. Якщо ж процес пароутворення переважає над конденсацією, то пара є ненасиченою.

Результати спостережень свідчать, що тиск і густина ненасиченої пари залежать від речовини, з якої вона складається, температури, а також об'єму, в якому пара міститься.

Отже, у певному об'ємі за певної температури не може міститися більшої кількості пари відповідної рідини.

Температуру за якої пара стає насиченою називають точкою роси.

! Головне в цьому параграфі

Сукупність молекул, що перебувають у просторі над рідиною, називають паром, а процес переходу рідини у стан пари — пароутворенням.

Пароутворення відбувається двома способами — випаровуванням і кипінням.

Випаровування — пароутворення, що відбувається за будь-якої температури з вільної поверхні рідини.

Пару, що перебуває в тепловій динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають насиченою. Густина і тиск насиченої пари за незмінної температури є величинами постійними.

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають пароутворенням; конденсацією; випаровуванням; паром?
2. Назвіть чинники, від яких залежить інтенсивність випаровування рідини.
3. Поясніть, чому під час випаровування рідини її температура знижується.
4. Яку пару називають насиченою; ненасиченою?
5. Які властивості мають насичена і ненасичена пари?

§ 28. Вологість повітря та її вимірювання

- ▶ *Вологість повітря*
- ▶ *Прилади для вимірювання вологості*

ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. Із поверхні водойм, вологого ґрунту, листків рослин, легенів і шкіри тварин та людини в атмосферу Землі випаровується величезна кількість водяної пари (10^{14} т/рік) і майже стільки ж води випадає у вигляді опадів. Тому атмосферне повітря, що є сумішшю різних газів (азоту N_2 — 78%, кисню O_2 — 21%, інертних газів, водяної пари), завжди містить і водяну пару. Хоча вміст водяної пари в атмосфері значно менший порівняно з іншими складовими, проте її значення для життєдіяльності всього живого на земній поверхні величезне.

Процеси випаровування впливають також на організм людини, що складається на 80–90% з води. За одну добу (залежно від роду занять) із поверхні шкіри і легенів людини випаровується майже 2 кг води. Це вказує на велике значення вологості навколишнього повітря для здоров'я й самопочуття людини. Тривале перебування в теплому й вологому повітрі порушує теплообмін в організмі. Людина стає в'ялою, її працездатність знижується. Важливе значення має вологість для життєдіяльності тваринного і рослинного світу, процесів сушіння виробів тощо. Контроль і підтримання необхідної вологості важливі також для зберігання книг, творів мистецтва, музичних інструментів, харчових продуктів, овочів, фруктів тощо. З метою підтримання необхідної вологості користуються приладами, які зволожують або осушують повітря.

Для характеристики вмісту водяної пари в повітрі використовують такі величини: абсолютна та відносна вологість.

Абсолютна вологість дорівнює масі водяної пари в одному кубічному метрі повітря (густина водяної пари). Абсолютну вологість позначають малою грецькою літерою ρ (читається «ро») г/м^3 : $[\rho] = 1 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$.

Оскільки за абсолютною вологістю не можна зробити висновок про те, наскільки водяна пара наближена до насичення, на практиці використовують ще одну величину — відносну вологість повітря. Відносну вологість позначають малою грецькою літерою φ (читається «фі») та вимірюють у відсотках: $[\varphi] = \%$.

Відносна вологість повітря — фізична величина, яка показує, на скільки водяна пара, що міститься в повітрі, наближається до насичення і дорівнює відношенню абсолютної вологості (або парціального тиску водяної пари p) до густини (або тиску p_0) насиченої водяної пари при тій же температурі, виражається у відсотках.

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%; \quad \varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%.$$

Тиск та густина насиченої водяної пари залежать від температури. Їх значення можна знайти в табл. 28.1.

Таблиця 28.1

Густина та тиск насиченої водяної пари при різних температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$p_0, \text{кПа}$	$\rho_0, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_0, \text{кПа}$	$\rho_0, \text{г/м}^3$
-5	0,40	3,2	14	1,60	12,1
0	0,61	4,8	15	1,71	12,8
1	0,65	5,2	16	1,81	13,6
2	0,71	5,6	17	1,94	14,5
3	0,76	6,0	18	2,07	15,4
4	0,81	6,4	19	2,20	16,3
5	0,88	6,8	20	2,33	17,3
6	0,93	7,3	21	2,49	18,3
7	1,0	7,8	25	3,17	23,0
8	1,06	8,3	50	12,3	83,0
9	1,14	8,8	60	19,9	129,4
10	1,23	9,4	70	31,0	195,7
11	1,33	10,0	80	47,3	290,2
12	1,40	10,7	90	70,0	417,6
13	1,49	11,4	100	101,3	588,3

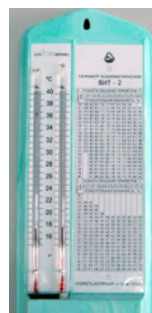
Водяна пара є насиченою, якщо її відносна вологість становить 100%. Чим меншим є значення відносної вологості повітря, тим меншим є вміст водяної пари у ньому. Фахівці стверджують, що нормою вологості повітря в житлових будинках можна вважати 40—60 %, якщо температура повітря становить приблизно 20 °С. Відносна вологість повітря — важливий екологічний показник середовища. В умовах надто низької або надто висо-

кої вологості спостерігаються швидка стомлюваність людини, погіршення сприйняття і пам'яті, висихання слизових оболонок носа. Вологість повітря у приміщенні можна змінювати, застосовуючи зволожувачі повітря.

Наявність вологи в повітрі різко змінює його теплопровідність і теплоємність. Тому спека і холод в умовах великої вологості переносяться значно важче. Взимку при великій вологості людина швидше мерзне, а обмороження може настати навіть при +4 °С. У спеку в тропічному кліматі піт, що виділяється людським організмом, через велику вологість повітря не може ефективно випаровуватися і знижувати температуру тіла. Це призводить до великих втрат води і порушення терморегуляції організму і його перегрівання.

Виявляється, що внаслідок охолодження до певної температури насичена водяна пара стає насиченою. Температуру, до якої необхідно охолодити повітря деякої вологості, щоб водяна пара стала насиченою, називають точкою роси.

ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГСТІ ПОВІТРЯ. Вологість повітря вимірюють спеціальними приладами — психрометром, гігрометром тощо. Психрометр (мал. 28.1) складається із двох термометрів: резервуар одного з них, який показує температуру повітря, залишається сухим, іншого — оточений шматком тканини, зануреної у воду. Завдяки випаровуванню води термометр охолоджується. Чим більша відносна вологість, тим менш інтенсивне випаровування і тим вищу температуру показує термометр, оточений вологою тканиною. За різницею показників термометрів і психрометричною таблицею (табл. 28.2.) можна визначити відносну вологість повітря.



Мал. 28.1. Психрометр

Таблиця 28.2.

Психрометрична таблиця

Покази сухого термо- метра, °С	Різниця показів сухого і вологого термометрів, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	82	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	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	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	50	45	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
Відносна вологість, %											

Наприклад, якщо показники сухого термометра становлять 20 °С, а вологого 15 °С, то їх різниця становить 5 °С. На перетині рядка показників сухого термометра 20 °С і різниці показників термометрів 5 °С знаходимо, що відносна вологість повітря за таких умов становитиме 59 %.

! Головне в цьому параграфі

Уміст водяної пари в повітрі характеризують такими фізичними величинами: абсолютна та відносна вологість повітря.

Абсолютна вологість дорівнює масі водяної пари в одному кубічному метрі повітря.

Відносна вологість повітря — фізична величина, яка показує на скільки водяна пара, що міститься в повітрі, наближається до насичення і дорівнює відношенню абсолютної вологості ρ до густини ρ_0 насиченої водяної пари при тій самій температурі, виражається у відсотках.

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$
 Відносну вологість вимірюють за допомогою психрометрів або гігрометрів.

? Запитання для самоперевірки

1. Що розуміють під вологістю повітря?
2. Що називають відносною вологістю повітря?
3. Що називають точкою роси?
4. За допомогою яких приладів визначають вологість повітря?
5. Які суб'єктивні відчуття вологості повітря людиною?

Вправа до § 28

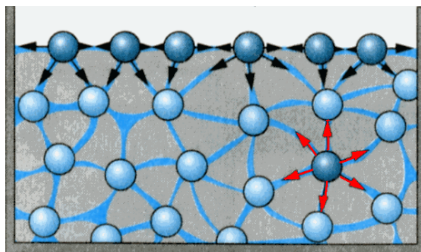
- 1 (п). Якщо кількість молекул, які щосекунди вилітають з рідини та повертаються до неї, однакова, то пара над рідиною є:
 - А Перегрітою
 - Б Насиченою
 - В Ненасиченою
 - Г Переохолодженою
- 2 (п). Кипіння — це пароутворення, яке відбувається:
 - А З усієї поверхні рідини
 - Б З її частини
 - В В усьому об'ємі рідини
 - Г Правильної відповіді немає.
- 3 (с). Температура кипіння води у відкритій посудині становить 100 °С. Вкажіть, як зміниться ця температура, якщо посудину закрити?
 - А Підвищиться
 - Б Знизиться
 - В Не зміниться
 - Г Спочатку знизиться, а потім підвищиться
- 4 (с). Тиск насиченої пари, що перебуває над рідиною, при збільшенні її об'єму:
 - А Зростає
 - Б Спадає
 - В Не змінюється
 - Г Спочатку зростає, а потім спадає

- 5 (с).** У закритій пляшці міститься повітря. Пляшку охолоджують, проте роса не утворюється. Укажіть, як під час охолодження змінюється абсолютна і відносна вологість повітря.
А Абсолютна вологість не змінюється, відносна зростає.
Б Абсолютна і відносна вологість зростають.
В Абсолютна вологість зменшується, відносна зростає.
Г Абсолютна і відносна вологість не змінюються.
- 6 (с).** Температура повітря $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, точка роси $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте відносну вологість повітря.
А 40 % **Б** 52 % **В** 62 % **Г** 70 %
- 7 (с).** Визначте відносну вологість повітря, якщо парціальний тиск при температурі $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить 1,59 кПа.
- 8 (д).** Густина насиченої водяної пари при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 2 г/м^3 . Визначте тиск водяної пари при цій температурі.
- 9 (д).** Термометри психрометра показують $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте парціальний тиск водяної пари та масу води, що містить за цих умов кожен квадратний метр повітря.
- 10 (д).** Ввечері при температурі $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносна вологість повітря становила 55 %. Визначте, чи випаде роса, якщо вночі температура повітря знизиться до $8\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- 11 (в).** Визначте точку роси якщо термометри психрометра показують 18 і $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 12 (в).** Столітрова посудина заповнена повітрям при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості 30 %. Якою стане відносна вологість повітря, якщо в посудину ввести 1 г води?

§ 29. Рідини. Поверхневий натяг рідин

- ▶ Рідини і гази
- ▶ Сила поверхневого натягу

РІДИНИ І ГАЗИ. Ви вже знаєте, що будь-яка хімічно однорідна речовина може бути за одних умов у газоподібному стані, а за інших — у рідкому. Водночас за своїми властивостями гази і рідини істотно відрізняються. Рідини, як і гази, не мають певної форми і набувають форми тієї посудини, в якій знаходяться, але газ не має власного об'єму і займає будь-який наданий йому об'єм. Об'єм рідини — постійний. Газ на відміну від рідин відносно легко стискається. Можливість молекул рідини здійснювати перескоки зумовлює її текучість. Найхарактернішою відмінністю рідини є те, що на межі з газом рідина утворює вільну поверхню (мал. 29.1). Усі сили, що діють на молекули всередині рідини, взаємно скомпенсовані. Рівнодійна ж сил притягання, що діє на молекули,



Мал. 29.1. Сили міжмолекулярної взаємодії молекул рідини



а)



б)

Мал. 29.2 а) металева скріпка на поверхні води; б) комаха-водомирка

які перебувають на поверхні розділу, напрямлена усередину рідини. Отже молекули поверхневого шару, товщина якого дорівнює радіусу дії молекулярних сил, чинять тиск на рідину, стягуючи її поверхню до мінімуму. Це явище називається явищем поверхневого натягу. Завдяки поверхневому натягу води на її поверхні можуть утримуватися легкі (навіть металеві) предмети і рухатися комахи-водомирки (мал.31.2).

СИЛА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ. Між молекулами на поверхні діють сили притягання, рівнодійна яких спрямовані перпендикулярно до поверхні рідини в її середину.

Силою поверхневого натягу називають силу, яка діє вздовж поверхні рідини перпендикулярно до лінії, що обмежує цю поверхню, і прагне скоротити її до мінімуму.

Під дією сил поверхневого натягу верхній шар рідини намагається скоротити площу своєї поверхні до мінімальних розмірів, можливих при певному об'ємі рідини. Мінімальну поверхню серед тіл певного об'єму має куля. Тому маленькі краплинки води близькі за формою до кулі (мал. 29.3).



Мал. 29.3. Маленькі краплинки води мають майже сферичну форму

Коефіцієнт поверхневого натягу σ дорівнює відношенню сили поверхневого натягу F_n до довжини лінії l , що обмежує поверхню розділу:

$$\sigma = \frac{F_n}{l}.$$

У СІ коефіцієнт поверхневого натягу виражають у ньютонках на метр [σ] = Н/м. Але існує визначення поверхневого натягу, як енергії (Дж) на розрив одиниці поверхні (м).

Сила поверхневого натягу залежить від природи речовини, характеристикою якої є коефіцієнт поверхневого натягу. Коефіцієнт поверхневого натягу, визначений для багатьох однорідних рідин і занесений до таблиць (табл. 29.1).

Таблиця 29.1

Коефіцієнт поверхневого натягу рідин при 20 °С

Речовина	σ , мН/м	Речовина	σ , мН/м
Вода	73	Молоко	46
Гас	24	Нафта	30
Бензин	21	Ртуть	510
Мильний розчин	40	Спирт	22

Коефіцієнт поверхневого натягу не залежить від довжини контуру, а визначається фізичними властивостями рідини, її станом. Унаслідок підвищення температури коефіцієнт σ зменшується через збільшення середньої відстані між молекулами на поверхні рідини. За критичної для певної рідини температури її поверхневий натяг дорівнює нулю. На значення коефіцієнта σ також впливає наявність у рідині домішок. Зокрема, мило зменшує коефіцієнт поверхневого натягу води з $72 \cdot 10^{-3}$ до $45 \cdot 10^{-3}$ Н/м. У процесі прання білизни значення σ зменшується як через нагрівання рідини, так і внаслідок введення мийних засобів, що сприяє легшому проникненню розчин у тканину. Бензин і різні спирти застосовують під час хімічного чищення одягу.

Під впливом рівнодійної сили притягання молекули поверхневого шару втягуються всередину рідини, її вільна поверхня скорочується, а отже, сила поверхневого натягу виконує роботу. Таким чином, верхній шар має енергію, що є сумарною потенціальною енергією молекул поверхневого шару рідини. Її називають поверхневою енергією й обчислюють за формулою:

$$W = \sigma S,$$

тоді робота сили поверхневого натягу:

$$A = \Delta W = \sigma \Delta S,$$

де σ — коефіцієнт поверхневого натягу; S — площа вільної поверхні рідини.

! Головне в цьому параграфі

Силою поверхневого натягу називають таку силу, яка діє вздовж поверхні рідини перпендикулярно до лінії, що її обмежує, намагаючись скоротити цю поверхню до мінімуму.

Характеристикою верхнього шару рідин є коефіцієнт поверхневого натягу, який дорівнює відношенню сили натягу F_n до довжини лінії l , що обмежує поверхню розділу і вздовж якої вона діє по дотичній в кожній точці, перпендикулярно до будь-якого елемента лінії розділу середовищ:

$$\sigma = \frac{F_n}{l}.$$

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини залежить від природи середовищ, які межують, і температури.

Поверхнева енергія дорівнює: $W = \sigma S$, а робота сили поверхневого натягу — $A = \Delta W = \sigma \Delta S$.

? Запитання для самоперевірки

1. Які властивості має поверхневий шар рідини? Що таке сила поверхневого натягу?
2. Що називають коефіцієнтом поверхневого натягу? Від чого він залежить? У яких одиницях вимірюється коефіцієнт поверхневого натягу в СІ?
3. Як зміниться сила поверхневого натягу води в разі розчинення в ній мила?
4. Якої форми набувають краплі рідини в умовах невагомості? Чому?

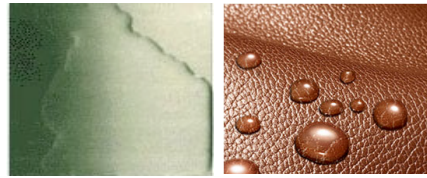
Вправа до § 29

- 1 (п). Коефіцієнт поверхневого натягу води зі зниженням температури:
А Не змінюється.
Б Зменшується.
В Збільшується.
Г Спочатку збільшується, а потім зменшується.
- 2 (п). Порівняйте масу крапель холодної та гарячої води, що падають із крана, відкритого в однаковому положенні:
А Краплі мають однакову масу.
Б Краплі холодної мають більшу масу.
В Краплі гарячої води мають більшу масу.
Г Маса крапель не залежить від температури води.
- 3 (с). Чому краплина жиру, що плаває на поверхні супу, має круглу форму?
- 4 (с). Якщо на поверхню води покласти нитку і з одного боку торкнутися шматочком мила, нитка почне рухатися. Поясніть це явище.
- 5 (д). Сірник масою 0,09 г лежить на поверхні води. З яким прискоренням він почне рухатися, якщо з одного боку торкнутися поверхні води милом. Довжина сірника — 4 см.
- 6 (д). З метою визначення коефіцієнта поверхневого натягу води учениця використала піпетку діаметром вихідного отвору 2 мм. Маса 40 крапель виявилася рівною 1,9 г. Яке значення коефіцієнта поверхневого натягу одержала учениця?
- 7 (д). Яку роботу слід виконати, щоб розбити краплю ртуті діаметром 4 мм на 8 однакових крапель діаметром 2 мм кожна?
- 8 (в). Підвішену на нитках дротяну прямокутну рамку зі сторонами 5 см і 10 см занурили у воду. Маса рамки становить 4 г. Яку силу необхідно прикласти, щоб піднімаючи рамку горизонтально, відірвати її від поверхні води.
- 9 (в). Дерев'яний кубик, довжина ребра якого 2 см, плаває на поверхні води. Густина дерева становить 500 кг/м^3 , води — 1000 кг/м^3 . Визначте глибину занурення кубика. Коефіцієнт поверхневого натягу води — 73 мН/м .

§ 30. Змочування. Капілярні явища

- ▶ Змочування
- ▶ Капілярні явища

ЗМОЧУВАННЯ. Якщо рідина межує з її ж парою, то взаємодії між молекулами слабкіші і їх можна не враховувати. Якщо поверхневий шар рідини межує з твердим тілом, то взаємодію молекул рідини і твердого тіла слід враховувати. У повсякденному житті можна спостерігати, що крапля води розпливається чистою поверхнею скла (мал. 30.1, а), але не розпливається забрудненою жиром — і має форму майже правильної кулі (мал. 30.1, б).



а) б)

Мал. 30.1. Рідина змочує (а) і не змочує поверхню (б)

Тоді говорять, що вода або змочує поверхню, або — не змочує.

Якщо взаємодія між молекулами рідини менша, ніж їх взаємодія з молекулами контактного твердого тіла, то вона його змочує і, навпаки, якщо ця взаємодія більша, — не змочує.

Явища змочування і незмочування відіграють важливу роль у побуті та техніці. Якби, наприклад, вода не змочувала тіло людини, то марним було б купання. Добре змочування потрібне під час фарбування і прання, паяння, збагачення руд цінних порід та інших технічних процесів.

КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА. Змочування або незмочування рідиною стінок посудини впливає на форму вільної поверхні рідини, а також призводить до її підняття або опускання у посудині, в яку занурено капіляр. Ці явища називаються капілярними. Як їх пояснити?

Зануримо в рідину густиною ρ циліндричний капіляр радіусом $r \approx 1$ мм (мал. 30.2). Її підняття в капілярі припиниться тоді, коли сила тяжіння піднятого стовпа рідини зрівноважить рівнодійну сил поверхневого натягу: $F_{\text{н}} = F_{\text{т}}$.

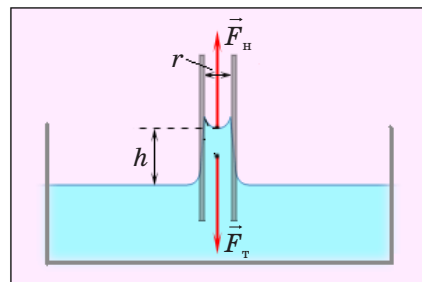
Сила поверхневого натягу $F_{\text{н}} = 2\pi r\sigma$. Сила тяжіння $F_{\text{т}} = mg$.

Оскільки $m = \rho V = \rho\pi r^2 h$, справедливою є рівність:

$$2\pi r\sigma = \rho\pi r^2 hg.$$

Звідси висота підняття рідини в циліндричному капілярі:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr},$$



Мал. 30.2. Підняття рідини у капілярі

де h — висота підняття рідини в циліндричному капілярі; σ — коефіцієнт поверхневого натягу рідини; ρ — її густина; r — радіус капіляра; g — прискорення вільного падіння.

Якщо рідина не змочує капіляр, то її рівень у ньому буде нижчим від рівня рідини в посудині. Різниця цих рівнів, яку також позначають h , має таку ж залежність від σ , ρ і r , як і під час змочування.

Капілярні явища мають велике значення в природі й техніці. Завдяки їм здійснюється проникнення вологи з ґрунту в стебла і листя рослин. Саме в капілярах відбуваються основні процеси, пов'язані з диханням і живленням організмів.

У будівництві враховують можливість підняття вологи капілярними порами будівельних матеріалів. З метою захисту фундаменту і стін від дії ґрунтових вод та вологи застосовують гідроізоляційні матеріали: толь, смоли тощо. Завдяки капілярному підняттю вдається фарбувати тканини. Часто капілярні явища використовують і в побуті. Застосування рушників, серветок, гігроскопічної вати, марлі, промокального паперу можливе завдяки наявності в них капілярів.

! Головне в цьому параграфі

Якщо взаємодія молекул рідини менша, ніж їх взаємодія з молекулами контактного твердого тіла, то маємо випадок змочування і навпаки, коли ця взаємодія більша, — незмочування.

Внаслідок дії сил поверхневого натягу рідини, що змочують поверхню тонких трубок — капілярів, піднімаються догори, а рідини, що не змочують поверхню трубок, опускаються вниз. Висота піднімання (або опускання) рідини дорівнює:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

? Запитання для самоперевірки

1. Розкрийте фізичну сутність явищ змочування і незмочування.
2. Чому плями з жиру на одязі не вдається змити водою?
3. Що називають капілярністю?
4. Обґрунтуйте, коли рідина в капілярі піднімається, а коли — опускається.
5. Виведіть формулу, за якою визначають висоту піднімання чи опускання рідини у капілярі.
6. Наведіть приклади врахування і використання капілярних явищ у повсякденному житті.

Вправа до § 30

- 1 (п). Вкажіть, унаслідок якої взаємодії відбуваються явища змочування і незмочування:
- А Молекул рідини між собою.
 - Б Молекул рідини і молекул пари над рідиною.
 - В Молекул рідини і молекул твердого тіла, з яким стикається рідина.
 - Г Правильної відповіді немає.

- 2 (п).** Яку рідину можна налити в склянку вище країв?
А Ту, що змочує скло.
Б Ту, що не змочує скло.
В Так зробити неможливо.
Г Будь-яку.
- 3 (с).** Під час занурення в рідину капілярної скляної трубки рівень рідини в ній піднявся на 4 мм над рівнем рідини в посудині. Чому дорівнюватиме висота підйому тієї самої рідини в скляній трубці з отвором вдвічі більшого діаметра?
А 16 мм **Б** 8 мм **В** 4 мм **Г** 2 мм
- 4 (с).** Визначте масу води, що піднялась у капілярній трубці діаметром 0,5 мм:
А 0,083 мг **Б** 12 мг **В** 0,083 кг **Г** 12 кг
- 5 (д).** У капілярній трубці, радіус якої 0,5 мм, рідинка піднялася на висоту 11 мм. Визначте густину цієї рідини, якщо її коефіцієнт поверхневого натягу становить 0,022 Н/м.
- 6 (д).** На яку висоту підніметься спирт між двома паралельними скельцями, відстань між якими 1 мм? Вважайте, що змочування поверхні скла спиртом повне. Густина спирту становить 800 кг/м³. Коефіцієнт поверхневого натягу спирту — 22 мН/м.
- 7 (в).** У двох капілярних трубках різного діаметра, занурених у воду, встановилася різниця рівнів 2,6 см. Коли ці трубки занурили у спирт, різниця рівнів стала 1 см. Знаючи коефіцієнт поверхневого натягу води, визначте коефіцієнт поверхневого натягу спирту. Густина води дорівнює 1000 кг/м³, спирту — 800 кг/м³. Коефіцієнт поверхневого натягу води 73 мН/м.

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №7

Задачі з цього розділу можна умовно поділити на такі типи: 1) на визначення вологості повітря; 2) на властивості поверхневого шару рідин; 3) на механічні властивості твердих тіл.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Відносна вологість повітря в закритій посудині при температурі 5 °С дорівнює 84 %, а при 22 °С — 30 %. У скільки разів тиск насиченої пари у другому випадку більший?

Дано:	СІ	Розв'язок
$t_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C};$ $\varphi_1 = 84\%;$ $t_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C};$ $\varphi_2 = 30\%;$	$T_1 = 278 \text{ К}$ $T_2 = 295 \text{ К}$	При відносній вологості φ_1 і температурі T_1 тиск водяної пари дорівнює $p_1 = \varphi_1 p_{01}$, відповідно $p_2 = \varphi_2 p_{02}$. Оскільки посудина закрита, то об'єм насиченої пари постійний. Тоді відповідно до закону Шарля:
$\frac{p_{н2}}{p_{н1}} = ?$		

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \text{ Знаходимо: } \frac{\varphi_1 p_{01}}{\varphi_2 p_{02}} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ звідси } \frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{\varphi_1 T_2}{\varphi_2 T_1}; \frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{0,84 \cdot 295 \text{ К}}{0,3 \cdot 278 \text{ К}} \approx 3.$$

Відповідь: у 3 рази.

Задача 2. У кімнаті при температурі $20\text{ }^\circ\text{C}$ відносна вологість повітря — 20% . Скільки води треба додатково випаровувати, щоб збільшити вологість до 50% , якщо об'єм кімнати становить 40 м^3 ?

Дано:

$$t = 20\text{ }^\circ\text{C};$$

$$\varphi_1 = 20\%;$$

$$\varphi_2 = 50\%;$$

$$V = 40\text{ м}^3$$

$$\Delta m \text{ — ?}$$

Розв'язок

При відносній вологості φ_1 густина пари $\rho_1 = \varphi_1 \rho_{01}$, а при φ_2 : $\rho_2 = \varphi_2 \rho_{02}$, де ρ_n — густина насиченої пари при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Тоді відповідно маса водяної пари: $m_1 = \varphi_1 \rho_{01} V$ і $m_2 = \varphi_2 \rho_{02} V$. Додатково треба випаровувати масу води:

$\Delta m = m_2 - m_1 = (\varphi_2 - \varphi_1) \rho_0 V$. За таблицею знаходимо $\rho_0 = 1,73 \cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3$. Після підстановки даних:

$$\Delta m = (0,5 - 0,2) 1,73 \cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3 = 0,208\text{ кг}$$

Відповідь: $\Delta m = 0,208\text{ кг}$.

Задача 3. Відносна вологість повітря ввечері при $16\text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює 22% . Чи випаде роса, якщо вночі температура зменшиться до $8\text{ }^\circ\text{C}$?

Дано:

$$t_1 = 16\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 22\%$$

$$t_2 = 8\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_2 \text{ — ?}$$

Розв'язок

Роса випаде за умови, якщо відносна вологість повітря при температурі $8\text{ }^\circ\text{C}$ буде дорівнювати 100% . Вважаємо, що при охолодженні густина водяної пари в повітрі не змінюється тобто густина водяної пари ρ_1 у повітрі при температурі $16\text{ }^\circ\text{C}$ має дорівнювати густині ρ_{0_2} насиченої пари при температурі $8\text{ }^\circ\text{C}$: $\rho_1 = \rho_{0_2}$.

За таблицею визначаємо густину насиченої пари при $16\text{ }^\circ\text{C}$. $\rho_{0_1} = 13,6 \cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3$ та при $8\text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{0_2} = 8,3 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$. З формули

$$\varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{0_1}} \cdot 100\% \text{ визначаємо } \rho_1:$$

$$\rho_1 = \varphi_1 \rho_{0_1} \cdot \rho_1 = 0,22 \cdot 13,6 \cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3 = 2,99 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3.$$

Оскільки під час охолодження до $8\text{ }^\circ\text{C}$ пара не досягне стану насичення, роса не випаде.

Відповідь: роса не випаде

Задача 4. Яким має бути найбільший діаметр пор у гніті (волоknі) нагрівального пристрою (керогазу), що працює на рідкому паливі — гасі, щоб він піднімався від дна ємності з пальним до пальника на висоту $h = 10\text{ см}$? Пори вважати однорідними циліндричними трубками. Густина гасу становить $\rho = 800\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, коефіцієнт поверхневого натягу

$$\sigma = 0,03\frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Дано:

$$h = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\sigma = 0,03 \text{ Н/м}$$

$$d - ?$$

Розв'язок

Висота підняття гасу по порах визначається за формулою: $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$. Враховуючи, що $d = 2r$, отримуємо:

мо: $d = \frac{4\sigma}{\rho g h}$. Після підстановки числових значень:

$$d = 0,15 \text{ мм.}$$

Відповідь: $d = 0,15 \text{ мм.}$

Задача 5. Під час пропускання через піпетку 4 см^3 рідкої оливи здобуто 304 краплі. Діаметр отвору кінця піпетки становить 1,2 мм, густина оливи — $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Знайти коефіцієнт поверхневого натягу оливи.

Дано:

$$V = 4 \text{ см}^3 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$\rho = 900 \text{ кг/м}^3$$

$$d = 1,2 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$n = 304$$

$$\sigma - ?$$

Розв'язок

Під час витікання рідини з піпетки перед відривом краплі утворюється «шийка», по якій і відбувається розрив поверхневої плівки. Вважаючи, що діаметр кінця піпетки дорівнює діаметру шийки d , а сила тяжіння F_T і сила поверхневого натягу F_H зрівноважують одна одну, визначаємо: $\sigma = \frac{F_T}{\pi d}$.

Силу тяжіння F_T можна визначити, знаючи об'єм рідини, що витікає V і кількість крапель n : $F_m = \frac{mg}{n} = \frac{\rho g V}{n}$, де m — маса рідини, що витікає; ρ — її густина. Отже,

$$\sigma = \frac{\rho g V}{\pi d n}; \quad \sigma = \frac{900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \text{ Н/кг} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 304} = 0,03 \text{ Н/м.}$$

Відповідь: $\sigma = 0,03 \text{ Н/м.}$

Задача 6. Тонке алюмінієве кільце радіусом 7,8 см лежить на поверхні мильного розчину. З яким зусиллям можна відірвати кільце від розчину? Температуру розчину вважати кімнатною. Маса кільця 4 г.

Дано:

$$R = 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$\sigma = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$$

$$F - ?$$

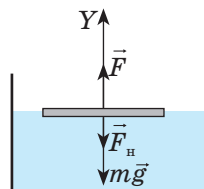
Розв'язок

На кільце діють сили як показано на малюнку. Оскільки кільце дотикається до мильного розчину і зовнішньою та внутрішньою поверхнями, то сила поверхневого натягу відповідно: $F_H = 2\sigma l$, де $l = 2\pi R$.

Сила яку необхідно прикласти, щоб відірвати кільце, дорівнює: $F = mg + 2\sigma l = mg + 4\pi\sigma R$. Після підстановки даних отримуємо: $F = 0,11 \text{ Н.}$

Відповідь: $F = 0,11 \text{ Н.}$

Малюнок. До задачі 6.



Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (д).** Тиск насиченої пари ефіру при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $24,7\text{ кПа}$, а при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 123 кПа . Порівняйте значення густини пари при цих температурах.
- 2 (д).** У 4 м^3 повітря при температурі $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ міститься 40 г водяної пари. Визначте відносну вологість.
- 3 (д).** Відень при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносна вологість повітря становила 60% . Скільки води у вигляді роси виділиться з кожного метра кубічного повітря, якщо температура вночі знизиться до $8\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- 4 (д).** Маса водяної пари в лабораторії дорівнює 385 г за температури $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і за відносної вологості повітря 50% . Густина насиченої водяної пари за температури $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $15,4\text{ г/м}^3$. Визначте об'єм лабораторії.
- 5 (д).** Визначте роботу, яку необхідно здійснити, щоб видути мильний пупир діаметром 10 см . Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину дорівнює 40 мН/м .
- 6 (д).** Пульверизатор для обприскування рослин утворює краплинки води із середнім діаметром 50 мкм . Яка робота витрачається на створення таких краплинок з $0,5\text{ кг}$ води?
- 7 (д).** У стеблі пшениці вода капілярами піднімається на висоту 1 м . Визначте середній діаметр капілярів.
- 8 (д).** Чому дорівнює різниця рівнів ртуті у двох капілярних трубках, розміщених в одній посудині із ртуттю. Діаметри капілярів відповідно рівні $0,5\text{ мм}$ і 1 мм . Густина ртуті становить $13\text{ 600}\text{ кг/м}^3$.
- 9 (в).** Під час витікання з бюретоки однакових об'ємів різних рідин, густиною $\rho_1 = 1030\text{ кг/м}^3$ і $\sigma_1 = 0,073\frac{\text{Н}}{\text{м}}$, та рідини, густиною $\rho_2 = 800\text{ кг/м}^3$ утворилось $n_1 = 25$ крапель першої рідини і $n_2 = 80$ крапель другої. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу другої рідини.
- 10 (в).** Яку силу необхідно докласти, щоб відірвати від поверхні води тонке кільце радіусом 5 см , виготовлене з дроту масою 4 г ?
- 11 (в).** Кубик плаває на поверхні води. Обчисліть глибину занурення кубика у воду без урахування сили поверхневого натягу; з урахуванням сили поверхневого натягу за умови, що поверхня кубика не змочується водою. Маса кубика становить 3 г , довжина його ребра складає 20 мм .
- 12 (в).** Відкрита з обох боків капілярна трубка діаметром $0,2\text{ мм}$ занурена вертикально у воду на глибину 10 см . На яку висоту над рівнем води у посудині підніметься вода в капілярі? Чому дорівнює її маса?
- 13 (в).** Яку роботу здійснюють сили поверхневого натягу води під час її підняття зануреним в неї капіляром?

§ 31. Рідкі кристали. Полімери. Наноматеріали

- ▶ Рідкі кристали
- ▶ Будова і властивості полімерів
- ▶ Будова і властивості наноматеріалів
- ▶ Практичне використання полімерів та наноматеріалів

РІДКІ КРИСТАЛИ. У попередніх параграфах ви ознайомилися з трьома агрегатними станами речовини — твердим, рідким та газоподібним. Для речовини в кожному з них характерні особливі фізичні властивості.

Наприкінці ХІХ ст. учені відкрили речовини, які в певному температурному інтервалі можуть перебувати в проміжному агрегатному стані, який є подібним як до твердого, так і рідкого. Ці речовини називають рідкими кристалами, а проміжний стан, в якому вони перебувають, — рідкокристалічним. У таких речовин дальній порядок у розташуванні молекул спостерігається лише в одному напрямку, а в двох інших існує лише близький порядок. Тобто речовини мають ніби ниткоподібну структуру. Хоча ці речовини плинні подібно до звичайних рідин, вони зберігають анізотропію фізичних властивостей, як і тверді кристали. Рідким кристалам властива наявність значних сил міжмолекулярної взаємодії, тому вони зберігають свій об'єм.

Не всі речовини можуть перебувати в проміжному рідкокристалічному агрегатному стані. Для цього молекули повинні мати не сферичну, а витягнуту в одному напрямку форму або помітне ущільнення (мал. 31.1, а). У більшості молекул довгі осі повинні орієнтуватися вздовж одного напрямку, який називають директором (мал. 31.1, б).

Це досягається визначенням для кожної речовини інтервалу температур, оскільки значне підвищення температури спричиняє руйнування порядку в орієнтації молекул і рідкий кристал перетворюється у звичайну рідину, а також при певній густині рідини.

Завдяки поєднанню властивостей твердих кристалів і рідин рідкокристалічним тілам властива висока чутливість до зовнішніх впливів (температури, тиску, електричного й магнітного полів). Тому їх використовують у різних електронних приладах і датчиках. Крім того, оскільки під впливом електричного поля деякі рідкі кристали змінюють колір, їх широко застосовують під час виготовлення дисплеїв електронних годинників, комп'ютерів, термометрів, плоских екранів телевізорів і в багатьох інших сучасних електронних технічних та побутових приладах і пристроях.

Рідкі кристали нині інтенсивно досліджують у багатьох наукових закладах як унікальні матеріали для сучасних електричних пристроїв.



Мал. 31.1. Особливості розташування молекул рідкокристалічних тіл

Рідкі кристали надзвичайно цікаві і дивовижні. Наразі відомо понад 10 000 органічних сполук, які є рідкими кристалами та вивчено понад 3000 речовин, що утворюють рідкі кристали. До них належать речовини біологічного походження, наприклад,

дезоксирибонуклеїнова кислота, що несе код спадкової інформації, і речовина мозку. Подальші дослідження цих речовин не тільки розширюють їх застосування, а й допомагають проникнути в таємниці біологічних процесів.

Рідкокристалічна наука є міждисциплінарною: її вивчають фізика, математика, хімія, біологія, медицина, електроніка тощо. Одним із напрямів, над якими працюють фізики — фахівці з рідких кристалів, є розроблення гнучких дисплеїв та електронних книжок, газет і журналів.

Сучасні технології дають можливість виготовляти надтонкі дисплеї комп'ютерів і телевізорів (мал. 31.2). У найближчому майбутньому дисплей комп'ютера матиме товщину меншу ніж 1 мм і буде абсолютно гнучким, як папір! Отже, фізика рідких кристалів є перспективною наукою, що динамічно розвивається і в якій кожен із вас зможе зробити нові відкриття. Тож навчайтеся наполегливо!



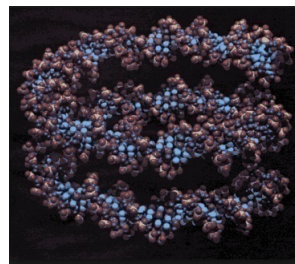
Мал. 31.2.
Надтонкі дисплеї

БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРІВ. У практичній діяльності людини великого значення набули аморфні речовини, які називають полімерами.

Полімери — природні та штучні сполуки, молекули яких складаються з великої кількості повторюваних однакових або різних за будовою атомних групувань, з'єднаних між собою в довгі лінійні або розгалужені ланцюги. Структурні одиниці, з яких складаються полімери, називають мономерами.

Широка гаульз застосування полімерів зумовлена їх особливими властивостями: еластичність — здатність до відновлення форми після значних деформацій; порівняно низька крихкість склоподібних і кристалічних полімерів (пластмаси, органічне скло); здатність молекул змінювати орієнтацію у просторі внаслідок механічного впливу (використовується під час виготовлення волокон і плівок); вони високостійкі в агресивних середовищах; ефективні електро- та теплоізолятори; полімери мають високу в'язкість розчинів та здатні змінювати власні властивості навіть при незначних домішках (вулканізація каучуку, дублення шкір тощо). Недоліком багатьох полімерів є схильність до старіння. Полімери можуть існувати як у кристалічному, так і в аморфному станах. Особливі властивості полімерів пояснюються не лише великою молекулярною масою, а й тим, що макромолекули мають ланцюгову будову і є гнучкими.

За походженням полімери поділяються на природні (натуральні), до яких належить велика група полімерів: білки, крохмаль, целюлоза, натуральний каучук, природний графіт тощо (мал. 31.3); синтетичні — утворені синте-



Мал. 31.3.
Природний полімер — білок ДНК

зом з мономерів: поліетилен, полістирол; штучні — утворюються з природних полімерів шляхом їх хімічної модифікації (наприклад, унаслідок взаємодії целюлози із азотною кислотою утворюється нітроцелюлоза).

БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ НАНОМАТЕРІАЛІВ. Основою наноматеріалів є наночастинки, розміри яких у мільярд разів менші за 1 м, або у мільйон разів менші за 1 мм. Наночастинка у стільки ж разів менша за лінійку довжиною 1 м, у скільки разів товщина пальця менша за діаметр Землі. Більшість атомів мають діаметр від 0,1 до 0,2 нм, а товщина ниток ДНК — близько 2 нм. Молекули мають розмір близько 1 нм.

Наноматеріал — не один «універсальний» матеріал, чи просто дуже дрібні («нано») частинки, а великий клас різних матеріалів.

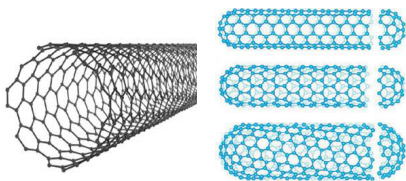
Наноматеріалами називають матеріали, основні фізичні характеристики яких визначаються властивостями нанооб'єктів, що містяться в них; кристалічні або аморфні системи, розмір частинок яких менший за 100 нм.

Сучасна наука класифікує такі види наноматеріалів: наночастинки; фулерени; нанотрубки та нановолокна; нанопористі структури (речовини); нанодисперсії; наноплівки; нанокристалічні матеріали.

Такі наноструктури можна розглядати як особливий стан речовини, оскільки властивості матеріалів, утворених за участю структурних елементів нанорозмірів, не ідентичні властивостям звичайної речовини. Наприклад, у наноматеріалів можна спостерігати зміну магнітних, тепло- і електропровідних властивостей. Для особливо дрібних матеріалів можна відзначити зміну температури плавлення у бік її зменшення.

Для наноматеріалів актуальна проблема їх зберігання і транспортування. Маючи розвинену поверхню, матеріали дуже активні й активно взаємодіють з навколишнім середовищем, насамперед це стосується металевих наноматеріалів.

Прикладом наноматеріалів є вуглецеві нанотрубки (мал. 31.4). У 1991 р. японський учений Суміо Ідзжима виявив довгі вуглецеві структури, які одержали назву нанотрубок. Нова молекулярна форма вуглецю відкрила цілу серію нових і несподіваних фізичних, механічних і хімічних властивостей. Ці унікальні властивості зробили нанотрубки ключовим елементом нанотехнологій. Нанотрубки можуть використо-

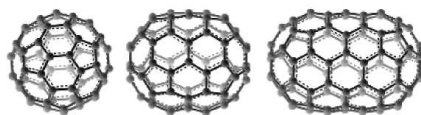


Мал. 31.4. Схематичне зображення одношарової (ліворуч) та двошарових (праворуч) вуглецевих нанотрубок

уватися під час виготовлення молекулярних електронних пристроїв, нанотранзисторів і елементів пам'яті. Вуглецеві нанотрубки значно міцніші за графіт, хоча складаються з тих же атомів Карбону. Ви вже знаєте, що в графіті атоми Карбону розташовані пошарово. Проте вам також відомо, що згорнутий трубкою аркуш паперу набагато складніше зігнути і розірвати ніж звичайний аркуш. Тому нанотрубки мають таку міцність. Завдяки унікальним механічним

властивостям нанотрубок можна виготовляти вуглецеві композити надзвичайної міцності для автомобільної й аерокосмічної промисловості.

Ще однією формою з'єднання молекул вуглецю є фулерени, які являють собою опуклі замкнуті багатогранники, складені з парного числа атомів вуглецю (мал. 31.5). Своєю назвою ці сполуки зобов'язані інженеру і дизайнеру Річарду Фуллеру, чий геодезичні конструкції побудовано за цим принципом.



Мал. 31.5. Фулерени

Фулерен — винятково стійке з'єднання. У кристалічному вигляді він не реагує з киснем, стійкий до дії кислот і лугів. Фулерен може утворювати сполуки, використовуючи внутрішню порожнину вуглецевої кулі, діаметр якої достатній, щоб у ній міг розміститися атом металу чи невелика молекула (мал. 36.5).

Отже, відкривається шлях до одержання хімічних сполук зовсім нового типу, де атом механічно утримується в замкнутому середовищі.

Одним із методів, що використовується для вивчення нанооб'єктів, є скануючо-зондна мікроскопія (СЗМ). За допомогою скануючо-зондного мікроскопа можна не лише побачити окремі атоми, а й вибірково впливати на них, зокрема переміщувати по поверхні. Ученим вже вдалося створити двовимірні наноструктури на поверхні, використовуючи цей метод. Наприклад, у дослідницькому центрі компанії із дослідження наноматеріалів, послідовно переміщуючи атоми Ксенону на поверхні монокристала нікелю, співробітники змогли викласти три букви логотипу компанії, використавши 35 атомів Ксенону.

Наноматеріали є основою для нанотехнологій, що забезпечують використання об'єктів, розміри яких менші за 1 мікрон і дають змогу проводити дослідження, маніпуляції та оброблення речовин у діапазоні розмірів від 0,1 до 100 нанометрів (1 нанометр — одна мільярдна метра) для одержання об'єктів з новими хімічними, фізичними, біологічними властивостями.

ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРІВ ТА НАНОМАТЕРІАЛІВ.

Людина вже давно використовує полімерні матеріали у своєму житті, наприклад, шкіру, хутро, шерсть, шовк, вапно та цемент. Проте наука про полімери як самостійна галузь виникла відносно недавно і як єдине ціле сформувалася лише в 50-х роках ХХ ст., коли було усвідомлено роль полімерів у розвитку технічного прогресу. Вона тісно пов'язана з фізикою хімією і може розглядатися як одна з базових основ сучасної молекулярної біології. Нині завдяки цінним властивостям полімери використовуються в машинобудуванні, текстильній промисловості, сільському господарстві, медицині, автомобіле-, судно- та авіабудуванні й у побуті. З полімерів виготовляють волокна, лакофарбові покриття та плівки.

Використання поліетиленової плівки у сільському господарстві — будівництво та експлуатація плівкових теплиць, дає змогу вирощувати продукцію цілий рік. У холодну пору теплиці обігріваються знову-таки

за допомогою полімерних труб, закладених у ґрунт на глибину 60—70 см, крім того, за допомогою полімерних труб проводять меліорацію земель. Цікаво, що термін експлуатації полімерних труб у системах дренажу в 3—4 рази довший, ніж аналогічних керамічних.

Використання полімерних матеріалів у машинобудуванні зростає настільки швидкими темпами, що їм немає аналогів у історії людства. Полімерам стали «довіряти» дедалі відповідальніші завдання, виготовляють все більше складних і багатофункціональних деталей машин і механізмів, наприклад полімери стали застосовують у виробництві великогабаритних корпусних деталей машин і механізмів, що несуть значні навантаження. І ще один факт: чверть усіх дрібних суден — катерів, шлюпок, човнів — тепер будується з пластичних мас. Майже три чверті внутрішнього оздоблення салонів легкових автомобілів, автобусів, літаків, суден і пасажирських вагонів виконується з декоративних пластиків, синтетичних плівок, тканин, штучної шкіри. Більше того, для багатьох машин і апаратів тільки використання антикорозійного покриття синтетичними матеріалами забезпечило їх надійну, довгострокову експлуатацію навіть в екстремальних умовах космосу.

До речі, ті самі переваги стимулюють і широке застосування полімерних матеріалів в авіаційній промисловості. Наприклад, заміна алюмінієвого сплаву графітопластиком при виготовленні підкрилка крила літака дає змогу скоротити кількість деталей з 47 до 14, а кріплень — з 1464 до 8 болтів, тим самим зменшивши вагу на 22 %, а вартість — на 25 %. Покриття поверхонь літаків або лопатей роторів вертольотів шаром поліуретану завтовшки 0,65 мм у 1,5—2 рази підвищує їхню стійкість до дощової ерозії. Такими є лише деякі приклади та основні тенденції впровадження полімерних матеріалів у різних галузях народного господарства.

У найближчі десять років прогноуються прискорений розвиток нанотехнологій та виготовлення і використання нових наноматеріалів, що забезпечить істотні зміни у таких галузях промисловості, як машинобудування, оптоелектроніка, мікроелектроніка, автомобільна промисловість, а також сільське господарство, медицина й екологія.

Завдяки специфічним властивостям наночастинок наноматеріали переважають «звичайні» за багатьма параметрами. Наприклад, міцність металу, одержаного за допомогою нанотехнологій, перевищує міцність звичайного в 1,5—3 рази, стійкість до корозії більша в 10—12 разів, крім того, такий метал у 50—70 разів є твердішим за звичайний.

Створення нанопорошків дасть можливість одержувати керамічні матеріали, надпровідники, сонячні батареї, фільтри та багато інших технічних засобів з новими фізичними і хімічними властивостями. Нанотехнології дають змогу створювати матеріали із самоочисними, водовідштовхувальними та іншими корисними властивостями.

! Головне в цьому параграфі

Рідкі кристали — це специфічний агрегатний стан речовини, у якому вона одночасно проявляє властивості кристала і рідини. Властивості рідких кристалів притаманні рідинам: набувають форми посудини; відсутня кристалічна ґратка, тому течуть; є в'язкими.

Полімерами називають природні та штучні сполуки, молекули яких складаються з великої кількості повторюваних однакових або різних за будовою атомних угруповань, з'єднаних між собою в довгі лінійні або розгалужені ланцюги. Структурні одиниці полімерів називають мономерами.

Наноматеріалами називають матеріали, основні фізичні характеристики яких визначаються властивостями наноб'єктів, що містяться в них; кристалічні або аморфні системи, розмір частинок яких менший за 100 нм.

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають рідкими кристалами?
2. Назвіть основні властивості рідких кристалів.
3. Наведіть приклади речовин, що є рідкими кристалами, та галузі їх використання.
4. Що називають полімерами?
5. Наведіть приклади штучних полімерів.
6. Наведіть приклади синтетичних полімерів.
7. Назвіть галузі застосування полімерів, їхні переваги та недоліки.

§ 32. Будова і властивості твердих тіл

- ▶ Кристалічні тіла
- ▶ Аморфні тіла
- ▶ Механічна напруга

КРИСТАЛІЧНІ ТІЛА. Твердими називають такі тіла, які зберігають об'єм і форму. Причиною такої стійкості є характер руху і взаємодії молекул: вони не можуть змінювати положення своєї рівноваги, здійснюючи малі коливання. Енергія і амплітуда коливань тим більші, чим вища температура тіла. Речовина перебуває у твердому стані тоді, коли середня потенціальна енергія взаємного притягання молекул значно більша від їх кінетичної енергії.

За впорядкованістю молекул відносно положення рівноваги тверді тіла поділяють на кристалічні (від грец. *krystallos* — лід) й аморфні (від грец. *amorphos* — той що без форми).

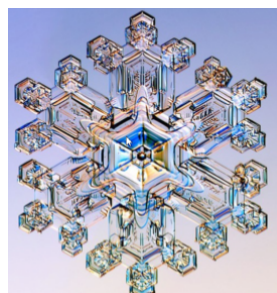
Правильна геометрична форма є істотною зовнішньою ознакою будь-якого кристала в природних умовах (візерунки на вікнах під час морозу, правильні форми сніжинок, кристалів кухонної солі, гірського кришталю тощо). Розглядаючи окремі кристали, можна переконатися, що вони



а

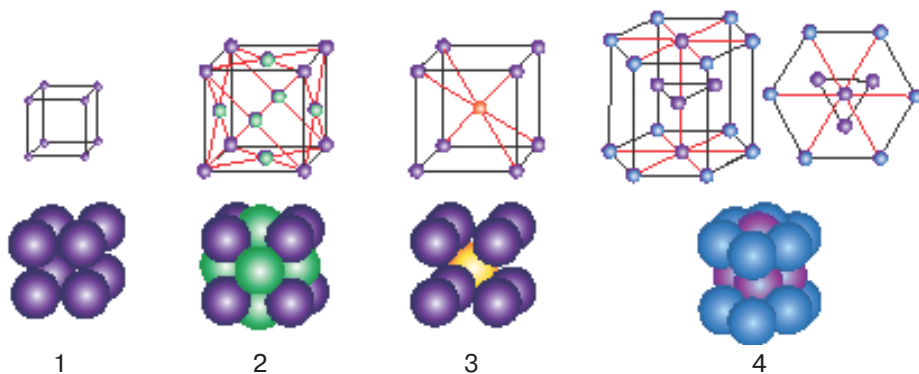


б

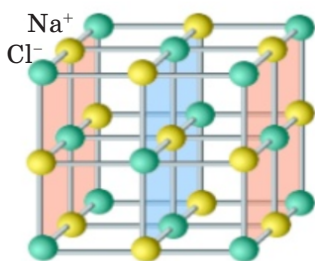


в

Мал. 32.1. Приклади кристалів: а) кварцу; б) гіпсу; в) води



Мал. 32.2. Типи кристалічних ґраток



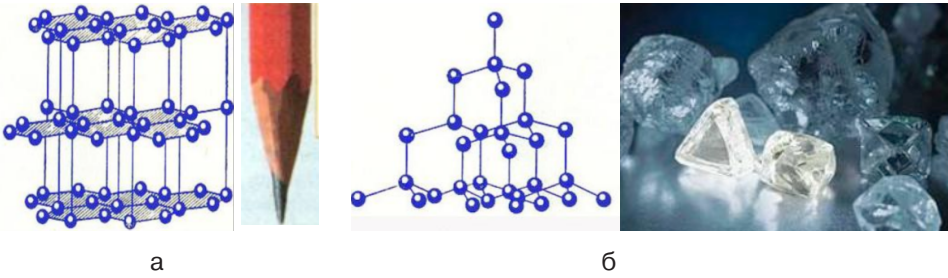
Мал. 32.3.
Кристалічна ґратка
галіту
(кухонної солі)

обмежені плоскими, ніби шліфованими, гранями у вигляді правильних багатокутників (мал. 32.1).

Виділимо маленький об'єм (елементарну комірку), завдяки якій можна побудувати весь кристал, як будинок із цегли. Елементарна комірка може мати форму куба, паралелепіпеда, призми тощо (мал. 32.2).

Існують різні види кристалічних ґраток, але головною їхньою особливістю є чітка періодичність атомів у просторі. Тому говорять, що в кристалічних тілах існує дальній порядок у розташуванні атомів. Наприклад, у кристалі галіту (кухонної солі) атоми Натрію й Хлору строго чергують, розташовуючись у вершинах куба (мал. 32.3).

Кристали — тіла, в яких атоми або молекули розміщені впорядковано і утворюють періодично повторювану внутрішню структуру (дальній порядок).



а б
Мал. 32.4. Кристалічні ґратки: а) графіту; б) алмазу

Властивості кристала великою мірою визначаються видом кристалічної ґратки. Пояснимо це на прикладі графіту. Кристалічна ґратка графіту має шарувату структуру (мал. 32.4, а), тобто в кожному шарі атоми Карбону розташовані у вершинах правильних шестикутників. Усередині шару взаємодія атомів доволі сильна, але самі шари слабо пов'язані один із одним, тому кристал графіту легко розшаровується, коли ми пишемо олівцем, на папері залишаються тонкі шари графіту.

Кристали однієї і тієї самої речовини можуть мати різну форму, яка залежить від умов їх утворення; вони можуть відрізнятися і кольором. На відміну від графіту в кристалі алмаза атоми Карбону розташовані у вершинах і на середині граней куба (мал. 34.4, б). При цьому всі атоми сильно пов'язані зі своїми найближчими сусідами. Саме цим міцним зв'язком атомів і зумовлена унікальна твердість алмаза.

Іноді весь шматок твердої речовини може становити один кристал (мал. 32.5, а). Такими є, наприклад, шматочки солі, гірського кришталю тощо. Усе це окремі кристали, їх називають монокристаллами. (від грец. *моно* — один).

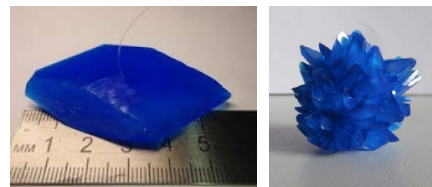
Характерною особливістю монокристалів є те, що багато їхніх властивостей залежать від напрямку в кристалі. Наприклад, кристал слюди легко розшаровується тільки в одному напрямку Тепло- і електропровідність монокристалів у різних напрямках також може бути різною.

Залежність фізичних властивостей від напрямку називають анізотропією.

Усі монокристали є анізотропними. Монокристали набули широкого застосування у техніці. Майже всі напівпровідникові прилади — це монокристали зі спеціально введеними домішками, які надають їм тих чи інших властивостей.

Тіло, яке складається з безлічі не-впорядковано розміщених маленьких кристаликів (мал. 32.5, б), називають полікристалічним або полікристалом (від грецького *полі* — багато).

Полікристали, на відміну від монокристалів, ізотропні, тобто їхні фізичні властивості не залежать від напрямку. Це легко зрозуміти, якщо врахувати, що полікристал складається з великої кількості маленьких



а б
Мал. 32.5. Кристал мідного купоросу: а) монокристал; б) полікристал

монокристалів, орієнтованих у довільних напрямках. Усі метали в твердому стані є полікристалами.

Результати дослідів свідчать, що кристалічні тіла плавляться і тверднуть за певної для кожної речовини температури, яку називають температурою плавлення. Під час нагрівання кристалічного тіла інтенсивність коливального руху його молекул підвищується, а з досягненням температури плавлення коливання стають такими інтенсивними, що молекули (атоми) вже не можуть утриматися у вузлах ґратки і вони руйнуються — відбувається плавлення. Кожна кристалічна речовина має певну температуру плавлення. Наприклад, лід за температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ тоне, перетворюючись у воду.

Умовно можна назвати чотири типи зв'язків між частинками в кристалах — іонний, атомний, металічний, молекулярний — і відповідно поділити тверді тіла на чотири типи кристалів.

У вузлах ґратки іонних кристалів містяться позитивно і негативно заряджені іони. Сили взаємодії між ними переважно електростатичні. До таких кристалів належать кристали кухонної солі, польового шпату, MgO тощо.

Класичним прикладом атомного кристалу є кристал алмазу, який складається з нейтральних атомів вуглецю. Атомні кристали утворюються тоді, коли між атомами виникають ковалентні зв'язки. Ковалентні сили забезпечують найміцніший зв'язок атомів у єдині кристалічні ґратки, тому атомні кристали є досить твердими та мають високі температури плавлення і теплоти випаровування.

У вузлах кристалічних ґраток молекулярних кристалів містяться молекули речовини, зв'язок між якими забезпечується силами молекулярної взаємодії. Оскільки ці сили слабкіші від сил іонного і ковалентного зв'язків, молекулярні кристали є менш міцними, плавляться за дуже низької температури (тверді гелій, водень, кисень, «сухий лід», нафталін, кристали бром, льоду, більшість кристалів органічних речовин).

Кристалічні ґратки металів утворюються позитивними іонами металу, які містяться в її вузлах. Електрони і додатні іони металу взаємно пов'язуються. Електрони не можуть залишити метал через притягання до позитивно заряджених іонів металу, а кристалічні ґратки, утворені з цих атомів, не розпадаються завдяки цементуючій дії електронного газу.

У вченні про будову твердих тіл важливу роль відіграє поняття про їх симетрію. Під симетрією кристалів розуміють закономірність, яка спостерігається у положенні їхніх частин на площині та в просторі. Кристалічні ґратки здебільшого мають одночасно кілька видів симетрії. Багато властивостей кристалів, передусім механічні й електричні, дуже чутливі до дефектів у кристалічних ґратках, а також наявності в них навіть мізерної кількості домішок. Дефекти реальних кристалів та їх структуру можна безпосередньо виявити за допомогою електронно-мікроскопічних і рентгенівських досліджень.

Кристали утворюються в природних умовах і штучно. За припущеннями вчених, у природних умовах багато кристалів утворилось внаслідок охолодження рідкої речовини земної кори — магми, що є розплавом різних речовин. Багато мінералів виникли з перенасичених водних

розчинів. Першим серед них слід назвати кам'яну сіль $NaCl$. Товщина пластів кам'яної солі, що утворилися під час випаровування води солоних озер, досягає в деяких родовищах кількох сотень метрів.

Останнім часом швидкими темпами розвивається технологія вирощування монокристалів усіма відомими способами на космічних орбітальних станціях. Невагомість і космічний вакуум дають можливість вирощувати монокристали небачених раніше розмірів і хімічної чистоти.

Монокристали набули широкого застосування в сучасній фізиці та техніці. Всі напівпровідникові прилади (діоди, транзистори) виготовляють із кристалів зі спеціально введеними домішками. Виникла нова галузь електроніки — молекулярна електроніка. Монокристали є основним елементом багатьох типів сучасних приладів, які дістали назву квантових підсилювачів і генераторів (мазерів і лазерів).

АМОРФНІ ТІЛА. За своєю будовою аморфні тіла нагадують дуже густі рідини. В аморфних тіл існує ближній порядок у розташуванні частинок речовини (мал. 32.6). Ці положення частинок не мають чіткого розташування у просторі, хоча найближчі «сусіди» й зберігають певний порядок у розташуванні, який називають ближнім. Прикладами аморфних тіл є шматки затверділої смоли, бурштин, вироби зі скла. Аморфні тіла ізотропні, тобто їхні фізичні властивості однакові у всіх напрямках.

Аморфні тіла не мають певної температури і питомої теплоти плавлення і з підвищенням температури поступово перетворюються в рідину.

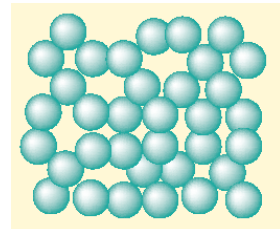
Аморфні тіла мають особливості. На відміну від полікристалів, аморфні тіла розбиваються на частинки довільної форми. Наприклад, розглядаючи під мікроскопом товчене скло, ми не помітимо шматочків, що мають правильну геометричну форму.

Ще однією характерною ознакою аморфних тіл є їх текучість. Наприклад, через значний проміжок часу віконне скло стає товстішим у нижній частині внаслідок стікання, а гиря, що стоїть на шматку смоли, з плином часу занурюється в неї.

Отже, залежно від характеру впливу та часу, впродовж якого діє сила, аморфні речовини поведуть себе або як крихкі тверді тіла, або як надто в'язкі рідини.

Ще одна особливість аморфних тіл — їх пластичність, тобто вони не відновлюють форму після припинення дії деформуючої сили.

Аморфний стан нестійкий: через деякий час аморфна речовина перетворюється в кристалічну. Але зазвичай цей час буває дуже тривалим (роки і десятиріччя). До таких тіл належить скло. Будучи спочатку прозорим, впродовж багатьох років воно мутніє: у ньому утворюються дрібні кристалики силікатів.



Мал. 32.6. Схема розташування молекул аморфних тіл

МЕХАНІЧНА НАПРУГА. Фізичною величиною, що характеризує дію внутрішніх сил, які виникають у деформованому тілі, є механічна напруга, що позначається грецькою літерою «сигма» (σ).

Механічна напруга σ визначається відношенням модуля сили пружності до площі поперечного перерізу S тіла.

$$\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}$$

Одиницею механічної напруги є $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}$.

Величина, яка характеризує здатність матеріалів протидіяти деформації одностороннього розтягування (стискання), називається модулем Юнга (модулем пружності) (E), що дорівнює відношенню механічної напруги σ до відносного видовження ε , спричиненого цією напругою у напрямку її дії.

$$E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|}$$

Отже механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню:

$$\sigma = E|\varepsilon|.$$

Цю залежність вважають формою запису закону Гука для пружної деформації розтягу.

Встановимо зв'язок між величинами, що входять до закону Гука, записаному у вигляді $F_{\text{пр}_x} = -kx$ та $\sigma = E|\varepsilon|$. Прирівняємо $\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}$ та $\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0}$.

Отримуємо $F_{\text{пр}} = \frac{ES\Delta l}{l_0}$, або, враховуючи, що $|x| = |\Delta l|$, $k = \frac{ES}{l_0}$.

Механічна напруга характеризує дію внутрішніх сил, які виникають у деформованому тілі. Вона визначається відношенням модуля сили пружності $F_{\text{пр}}$ до площі поперечного перерізу S тіла: $\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}$

Механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ε :

$$\sigma = E|\varepsilon|.$$

Знаходження діаграми розтягу і дослідження поведінки тіла за зовнішніх механічних навантажень є важливим у практичному використанні матеріалів (мал. 32.7).

Ділянка OA. Виконується закон Гука. Деформація є пружною.

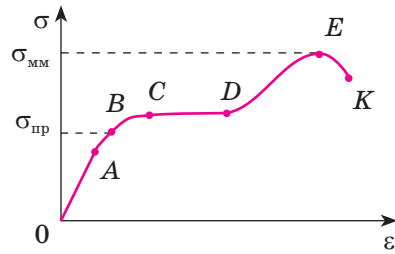
Ділянка AB. Закон Гука не виконується, але деформація пружна. Максимальна напруга, за якої ще не виникає помітна залишкова деформація, називається межею пружності $\sigma_{\text{пруж}}$.

Якщо і далі розтягувати тіло, то виникає залишкова деформація (*ділянка BC*) — деформація, у результаті якої тіло залишається деформованим після припинення дії зовнішньої сили. Таку деформацію ще називають пластичною.

Далі видовження тіла відбувається майже без зміни напруги в ньому — говорять «матеріал тече». *Ділянка CD* — текучість матеріалу.

Зі збільшенням деформації крива напруг починає підніматися і досягає максимуму в точці *E*. Потім напруга швидко спадає і тіло руйнується (точка *K*). Отже, розрив настає після того, як напруга досягне максимального значення σ_m , що називається межею міцності (точка *E*).

Під час розрахунку конструкції допустиму напругу обирають так, щоб вона становила певну частку від границі міцності. Число, яке показує, у скільки разів границя міцності більша за допустиму напругу, називається запасом міцності: $\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_d}$. Зазвичай запас міцності вибирають не менше 3.



Мал. 32.7. Діаграма розтягу

! Головне в цьому параграфі

За впорядкованістю молекул відносно положення рівноваги тверді тіла поділяють на кристали й аморфні тіла.

Умовно можна назвати чотири типи зв'язків між частинками в кристалах — іонний, атомний, металічний, молекулярний — і відповідно поділити тверді тіла на чотири типи кристалів.

Кристалічними називають тверді тіла, атоми або молекули яких здійснюють теплові коливання біля положення рівноваги, що утворюють так звані вузли кристалічної ґратки.

Для кристалічних тіл характерним є дальній порядок у розташуванні атомів. Кристалічні тіла поділяють на монокристали й полікристали. Залежність фізичних властивостей від напрямку називають анізотропією.

Найважливішою властивістю будь-якого кристалічного тіла є наявність певної фіксованої температури плавлення, за якої воно перетворюється в рідину, не розм'якшуючись перед цим.

Атоми аморфних тіл зберігають ближній порядок. Основні особливості аморфних тіл: текучість, в'язкість, ізотропність, відсутність фіксованої температури плавлення.

? Запитання для самоперевірки

1. Чим відрізняються кристалічні тіла від аморфних?
2. Назвіть основні властивості кристалічних тіл.
3. Які основні властивості аморфних тіл.
4. Що таке анізотропія? Ізотропність?

5. Назвіть основні властивості кристалічних тіл.
6. Як візуально можна відрізнити кристал від аморфного тіла?
7. Які існують типи зв'язків між частинками в кристалах? Охарактеризуйте кожен із них.
8. Що таке механічна напруга та межа міцності?

Вправа до § 32

- 1 (с).** Обчисліть значення сили, що діє уздовж осі закріпленого стержня, якщо в ньому виникає механічна напруга 200 ГПа. Діаметр стержня становить 5 мм.
- 2 (д).** На скільки видовжиться сталевий дріт довжиною 1 м і діаметром 0,75 мм², якщо на ньому підвісити вантаж масою 2 кг? Масою дроту знехтувати. Модуль Юнга для сталі дорівнює 200 ГПа.
- 3 (д).** Підйомний кран рівномірно переміщує вантаж масою 2 т. При якому діаметрі сталевого троса механічна напруга не перевищуватиме 60 МПа?
- 4 (в).** При якому абсолютному видовженні сталевий стержень довжиною 2 м з площею поперечного перерізу 10 мм² має потенціальну енергію 44 Дж?
- 5 (в).** Сталеву стрічку шириною 10 см і товщиною 1,5 см розтягують силою 100 кН. Який запас міцності має стрічна? Границя міцності для сталі становить 500 МПа.

§ 33. Внутрішня енергія. Способи зміни внутрішньої енергії тіла

- ▶ *Внутрішня енергія*
- ▶ *Способи зміни внутрішньої енергії тіла*

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. Загальні властивості термодинамічних систем та закони збереження енергії в них вивчає термодинаміка — наука про взаємні перетворення теплоти та інших форм енергії.

Термодинаміка є основою сучасних технологій зі створення різноманітних теплових машин, криогенних установок для одержання зріджених газів, а також використовується у фізиці надпровідності, плазми, для опису еволюції Всесвіту.

В основу термодинаміки покладено поняття внутрішньої енергії (U). Поряд із механічною макроскопічні тіла мають ще й внутрішню енергію (енергію всередині цих тіл). Ця енергія входить до балансу енергетичних перетворень у природі.

З погляду МКТ речовини внутрішня енергія макроскопічного тіла термодинамічної системи дорівнює сумі кінетичних енергій безперервного теплового руху всіх молекул (атомів) відносно центру мас тіла і потенціальних енергій їх взаємодії між собою.

Встановимо залежність між внутрішньою енергією ідеального одноатомного газу і його макроскопічними параметрами.

Оскільки молекули цього газу між собою не взаємодіють, то потенціальна енергія $E_{\text{п}} = 0$. Уся внутрішня енергія складається із кінетичної енергії руху $E_{\text{к}}$, яка, за формулою Больцмана, $\bar{E}_{\text{к}} = \frac{3}{2}kT$.

Враховуючи, що кількість молекул дорівнює $N = \frac{m}{M}N_{\text{А}}$, отримаємо, що внутрішня енергія одноатомного ідеального газу

$$U = \frac{3}{2}kT \frac{m}{M}N_{\text{А}}, \text{ де } kN_{\text{А}} = R.$$

Отже:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \text{ або } U = \frac{3}{2} pV,$$

де m — маса всього газу; M — молярна маса; R — універсальна газова стала; T — термодинамічна температура; p — тиск газу; V — об'єм газу.

Внутрішня енергія ідеального одноатомного газу пропорційна температурі й не залежить від об'єму та інших макропараметрів.

Зміна внутрішньої енергії певної маси ідеального газу здійснюється лише внаслідок зміни його температури T :

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Якщо газ не одноатомний, то його молекули не лише рухаються поступально, а й обертаються. Внутрішня енергія таких газів дорівнює сумі енергій поступального і обертального рухів.

У реальних газах, рідинах і твердих тілах середня потенціальна енергія взаємодії молекул не дорівнює нулю, тому їхня внутрішня енергія залежить від об'єму речовини й температури.

СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ТІЛ. Із базового курсу фізики ви знаєте, що внутрішню енергію термодинамічної системи можна змінити двома способами: виконанням роботи та теплопередачею.

Теплопередачею або теплообміном називають процес передачі енергії від одного тіла до іншого без виконання роботи. Теплопередача може здійснюватися такими способами:

- 1) теплопровідністю;
- 2) конвекцією;
- 3) випромінюванням.

Механізм теплопровідності обумовлений хаотичним рухом і взаємодією молекул речовини (мал. 33.1).

Конвекція — теплообмін, який здійснюється під час перемішування нерівномірно нагрітих шарів рідини або газу (мал. 33.2).



Мал. 33.1. Механізм тепло-
провідності



Мал. 33.2.
Механізм конвекції

Теплове випромінювання (або променевий теплообмін) здійснюється усіма без винятку тілами за рахунок випромінювання власної внутрішньої енергії в енергію електромагнітного випромінювання і навпаки, перетворення поглинутої енергії у внутрішню.

Інший спосіб зміни внутрішньої енергії тіла — виконання механічної роботи. Внутрішня енергія може змінюватись не лише під час теплообміну, а й під час виконання механічної роботи. Наприклад, під час свердління металеві деталі свердло і деталь нагріваються; нагрівається пилка під час розпилювання деревини тощо. Під час тертя, і взагалі за будь-якого опору руху, механічна енергія перетворюється у внутрішню.

! Головне в цьому параграфі

Внутрішня енергія макроскопічного тіла термодинамічної системи дорівнює сумі кінетичних енергій безперервного теплового руху всіх молекул (атомів) відносно центру мас тіла і потенціальних енергій їх взаємодії між собою.

Внутрішня енергія одноатомного ідеального газу визначається за формулою: $\Delta U = \frac{3}{2} m R \Delta T$.

Змінити внутрішню енергію можна двома способами: виконанням роботи або теплопередачею.

? Запитання для самоперевірки

1. Від яких фізичних величин залежить внутрішня енергія тіла?
2. Виведіть формулу внутрішньої енергії одноатомного ідеального газу.
3. Моль якого газу — водню чи гелію — за однакової температури має більшу внутрішню енергію?
4. Що називають теплопередачею чи теплообміном?
5. Назвіть види теплообміну та наведіть приклади.

Вправа до § 33

- 1 (с). Визначте внутрішню енергію 10 моль одноатомного газу при температурі 27 °С.

- 2 (д). На скільки змінюється внутрішня енергія 200 г гелію при збільшенні температури на 20 °С?
- 3 (д). Визначте внутрішню енергію гелію, що заповнює аеростат об'ємом 60 м³ при тиску 100 кПа.
- 4 (в). При зменшенні об'єму одноатомного газу в 3,6 раза його тиск збільшився на 20%. У скільки разів змінилася внутрішня енергія?

§ 34. Теплові процеси та їхні характеристики.

Рівняння теплового балансу

- ▶ *Кількість теплоти*
- ▶ *Рівняння теплового балансу*

КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. Щоб обчислити зміну внутрішньої енергії в процесі теплообміну, вводять поняття кількості теплоти.

Кількість теплоти (Q) — фізична величина, яка показує скільки енергії, передано в процесі теплообміну від одного макроскопічного тіла до іншого без виконання роботи.

Одиниця кількості теплоти — джоуль, $[Q] = 1 \text{ Дж}$.

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання тіла і яка виділяється внаслідок охолодження тіла, розраховується за формулою: $Q = cm\Delta T$, де c — питома теплоємність речовини; m — маса тіла; ΔT — зміна температури тіла.

Питома теплоємність (c) — фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, отриманій або відданій 1 кг речовини при зміні її температури на 1 К (або 1 °С).

У багатьох випадках для вивчення процесів теплообміну зручно користуватися такою величиною, як теплоємність.

Теплоємність — фізична величина, яка визначається кількістю теплоти, яку потрібно надати тілу для підвищення його температури на один Кельвін (або один градус Цельсія).

Здебільшого теплоємність позначається великою латинською літерою C , $[C] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. Отже:

$$Q = C\Delta T ; C = cm .$$

Кількість теплоти, яка поглинається під час плавлення або виділяється під час кристалізації твердого тіла, взятого при температурі плавлення (кристалізації), визначається за формулою:

$$Q = \lambda m ,$$

де λ — питома теплота плавлення; m — маса тіла.

Нагадаємо, що кристалічні тіла починають плавитись при фіксованому значенні температури (температурі плавлення), яка залишається незмінною у процесі плавлення. Температура плавлення кристалічної речовини дорівнює температурі її кристалізації.

Кількість теплоти, необхідна для випаровування або яка виділяється при конденсації речовини, взятої при температурі пароутворення (кипіння), визначається за формулою:

$$Q = rm ,$$

де r — питома теплота пароутворення.

Температура кипіння рідини дорівнює температурі конденсації. Нагадаємо, що в процесі кипіння (конденсації) рідини її температура лишається сталою.

Кількість теплоти, яка виділяється під час згорання палива, визначається за формулою:

$$Q = qm ,$$

де q — питома теплота згорання палива.

Величина η , яка характеризує ефективність нагрівника, називається коефіцієнтом корисної дії (ККД). ККД нагрівника показує, яку частину загальної кількості теплоти, виділеної нагрівником $Q_{\text{заг}}$, становить корисно використана теплота $Q_{\text{кор}}$:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{заг}}} .$$

РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ. Оскільки при чистому теплообміні жодних інших видів змін внутрішньої енергії немає, то на підставі закону збереження енергії можна стверджувати, що в теплоізованій системі за відсутності втрат енергії скільки теплоти віддадуть одні тіла, стільки ж набудуть інші. На цій підставі складають рівняння теплового балансу.

Рівняння теплового балансу описує теплообмін у замкнутій системі:

$$\sum Q_{\text{отр}} = \sum Q_{\text{відд}} ,$$

де $\sum Q_{\text{отр}}$ — сумарна кількість теплоти, отримана тілами під час теплообміну; $\sum Q_{\text{відд}}$ — сумарна кількість теплоти, віддана тілами під час теплообміну.

Теплообмін відбувається доти, доки температури тіл не зрівняються — настане тепла рівновага.

Загальну температуру після теплообміну прийнято позначати θ (грец. «тета»).

Задача. В алюмінієвий калориметр масою 300 г поклали шматок льоду. Температура калориметра і льоду -15 °С. Через калориметр пропустили певну кількість водяної пари при температурі 100 °С. Після цього температура суміші в калориметрі стала 25 °С, а її маса 500 г. Визначте масу льоду в калориметрі та масу конденсованої пари.

Дано:

$$m_{\kappa} = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг};$$

$$t_o = -15 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{п}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\theta = 25 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$m_c = 500 \text{ г} = 0,5 \text{ кг}$$

$$m_{\text{л}} \text{ — ?}$$

$$m_{\text{п}} \text{ — ?}$$

Розв'язок

У теплообміні беруть участь: калориметр; лід; вода, що утворилась із льоду, який розтанув; пара; вода, що утворилась при конденсації пари.

Оскільки температура суміші в калориметрі встановилась $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, отже, весь лід розтанув і вся пара сконденсувалась.

Калориметр отримує кількість теплоти: $Q_1 = c_{\kappa} m_{\kappa} (\theta - t_o)$.

Лід нагрівається до температури плавлення $t_{\text{пл}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_2 = c_{\text{л}} m_{\text{л}} (t_{\text{пл}} - t_o).$$

Лід отримує кількість теплоти на плавлення: $Q_3 = L m_{\text{л}}$

Нагрівання води, що утворилась із льоду до $\theta = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $Q_4 = c_{\text{в}} m_{\text{л}} (\theta - t_{\text{пл}})$.

Пара при конденсації пара віддає кількість теплоти: $Q_5 = r m_{\text{п}}$.

Вода, що утворилась із пари, охолоджується від температури $t_{\text{п}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до температури $\theta = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, віддає кількість теплоти: $Q_6 = c_{\text{в}} m_{\text{п}} (t_{\text{п}} - \theta)$

Складаємо рівняння теплового балансу: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6$.

Оскільки маса суміші, що утворилась у калориметрі: $m_c = m_{\text{л}} + m_{\text{п}}$, то маса пари: $m_{\text{п}} = m_c - m_{\text{л}}$.

Рівняння теплового балансу записуємо:

$$\begin{aligned} c_{\kappa} m_{\kappa} (\theta - t_o) + c_{\text{л}} m_{\text{л}} (t_{\text{пл}} - t_o) + L m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} (\theta - t_{\text{пл}}) = \\ = r m_c - r m_{\text{л}} + c_{\text{в}} (m_c - m_{\text{л}}) (t_{\text{п}} - \theta). \end{aligned}$$

$$\text{Звідси: } m_{\text{п}} = \frac{r m_c + c_{\text{в}} m_c (t_{\text{п}} - \theta) - c_{\kappa} m_{\kappa} (\theta - t_o)}{c_{\text{л}} (t_{\text{п}} - t_o) + L + c_{\text{в}} (\theta - t_{\text{пл}}) + r + c_{\text{в}} (t_{\text{п}} - \theta)}.$$

При підстановці даних та табличних значень питомої теплоємності алюмінію, води, льоду, питомої теплоти плавлення льоду та питомої теплоти пароутворення води отримуємо: $m_{\text{л}} = 0,42 \text{ кг}$; $m_{\text{п}} = 0,08 \text{ кг}$.

Відповідь: $m_{\text{л}} = 0,42 \text{ кг}$; $m_{\text{п}} = 0,08 \text{ кг}$.

! Головне в цьому параграфі

Кількість теплоти (Q) — фізична величина, яка показує, скільки енергії передано в процесі теплообміну від одного макроскопічного тіла до іншого без виконання роботи.

Рівняння теплового балансу описує теплообмін у замкнутій системі:

$$\sum Q_{\text{отр}} = \sum Q_{\text{від}},$$

де $\sum Q_{\text{отр}}$ — сумарна кількість теплоти, одержана тілом при теплообміні; $\sum Q_{\text{від}}$ — сумарна кількість теплоти, віддана тілом при теплообміні.

? Запитання для самоперевірки

1. Що таке кількість теплоти? До якого способу зміни внутрішньої енергії відносять цю назву?
2. Що показує питома теплоємність речовини?
3. Від чого залежить кількість теплоти, передана тілу під час нагрівання? Напишіть формулу для обчислення кількості теплоти.
4. Від чого залежить кількість теплоти, яка потрібна для випаровування рідини або яка виділяється під час конденсації пари?

Вправа до § 34

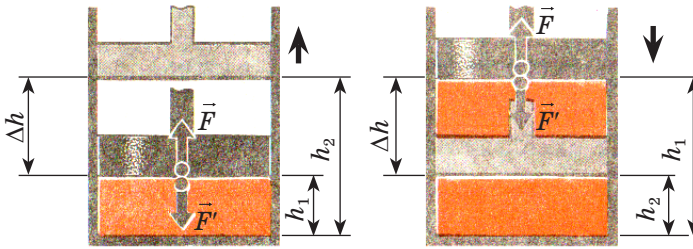
- 1 (д). Температура залізного котла масою 10 кг, в який налито 20 кг води, становить 10 °С. Яку кількість теплоти потрібно надати котлу з водою, щоб нагріти їх до температури 100 °С?
- 2 (д). Якою стане температура води, якщо змішати 100 г окропу і 100 г води, температура якої дорівнює 20 °С?
- 3 (д). Яка маса льоду, взятого при 0 °С, розплавиться, якщо йому передати таку кількість теплоти, що виділяється під час конденсації 8 кг водяної пари при 100 °С і нормальному атмосферному тиску?
- 4 (в). У калориметр, теплоємність якого дорівнює 63 Дж/°С, налили 250 г олії при температурі 12 °С. Після того, як в олію вкинули мідне тіло масою 500 г і температурою 100 °С, у калориметрі встановилася температура 33 °С. Визначте за даними досліду питому теплоємність масла.
- 5 (в). Скільки енергії виділилось під час горіння спирту, якщо за рахунок цієї енергії вода масою 100 г нагрілась від 30 до 80 °С, а теплота, витрачена на нагрівання води, становить 20% тієї теплоти, що виділилась?

§ 35. Робота в термодинаміці

- ▶ *Робота газу*
- ▶ *Графічне подання роботи в термодинаміці*

РОБОТА ГАЗУ. Робота в термодинаміці визначається подібно до того, як ми визначали її у механіці. При цьому виконання роботи в термодинаміці пов'язане зі зміною об'єму термодинамічної системи. Розглянемо газ у циліндричній посудині під невагомим і легко рухомим поршнем площею S (мал. 35.1, а).

Газ, збільшуючись в об'ємі виконує роботу проти сил, зумовлених зовнішнім тиском p . У випадку повільного рівномірного руху внутрішній тиск газу завжди дорівнюватиме зовнішньому, і, отже, сила тиску: $F = pS$. При цьому робота газу дорівнює:



Мал. 35.1. Зміна стану термодинамічної системи:
а — при розширенні; б — при стисканні

$$A = F\Delta h = pS\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1).$$

Оскільки $Sh_1 = V_1$ — початковий об'єм газу, а $Sh_2 = V_2$ — кінцевий, то роботу газу можна подати через зміну його об'єму:

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1).$$

Під час розширення газ виконує додатну роботу, оскільки напрям сили і напрям переміщення поршня збігаються.

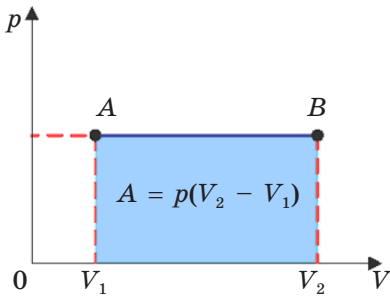
Під час стискання газу під дією зовнішніх сил, F' робота газу буде від'ємна (мал. 35.1, б). Таким чином, у випадку коли однакової величини переміщення поршня Δh робота A' , яку виконують зовнішні сили над газом, відрізняється від роботи газу A лише знаком: $A' = -A$. Виконуючи над газом роботу, зовнішні тіла передають йому енергію. Під час розширення, навпаки, газ передає енергію зовнішнім тілам.

Відповідно до рівняння Менделєєва — Клапейрона ($pV = \nu RT$) справедливим є вираз: $A_\mu = R\Delta T$. Звідси при зміні температури $\Delta T = 1\text{К}$ універсальна газова стала $R = A_\mu$. Отже, можна сформулювати фізичний зміст універсальної газової сталої.

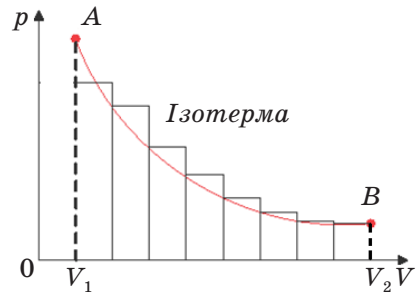
Універсальна газова стала R чисельно дорівнює роботі ізобарного розширення одного моля ідеального газу під час нагрівання його на 1 К.

Якщо процес ізохорний, то робота термодинамічної системи $A = 0$, адже $V = \text{const}$ (геометричний зміст роботи).

ГРАФІЧНЕ ПОДАННЯ РОБОТИ В ТЕРМОДИНАМІЦІ. Якщо процес ізобарного розширення газу зобразити в координатах p, V , то можна помітити, що для обчислення роботи газу достатньо визначити площу фігури під графіком у цих координатах (мал. 35.2).



Мал. 35.2. Робота газу дорівнює площі прямокутника V_1ABV_2



Мал. 35.3. Графічне обчислення роботи газу при ізотермічному процесі

Робота газу дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності $p(V)$, прямими, що проходять через V_1, V_2 та віссю V . Це твердження справедливе і у випадку більш складної залежності між тиском та об'ємом газу. Розглянемо залежність $p(V)$ для ізотермічного процесу (мал. 35.3).

У цьому випадку тиск газу зменшується обернено пропорційно об'єму. Щоб обчислити роботу, площу фігури V_1ABV_2 ділять на невеликі ділянки й обчислюють площу кожної з них, а одержані результати сумують.

! Головне в цьому параграфі

Виконання роботи в термодинаміці пов'язане зі зміною об'єму та температури термодинамічної системи.

Робота газу $A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$.

Робота A' , яку виконують зовнішні сили над газом, відрізняється від роботи газу A лише знаком: $A' = -A$.

Під час розширення газ виконує додатну роботу, оскільки напрямки сили і напрямку переміщення поршня збігаються. Розширюючись, газ передає енергію навколишнім тілам.

Під час ізохорного процесу $A = 0$.

? Запитання для самоперевірки

1. Чим відрізняється робота, що виконується зовнішніми тілами над газом, від роботи газу над зовнішніми тілами?
2. Чи виконується робота у процесі ізобарного стиснення або розширення газу?
3. Чому газ під час стиснення нагрівається?
4. Поясніть, як графічно визначають роботу ізобарного розширення газу.
5. Чому дорівнює робота газу під час ізохорного процесу?
6. Поясніть, як графічно визначають роботу ізотермічного розширення газу.

§ 36. Закони термодинаміки

- ▶ *Перший закон термодинаміки*
- ▶ *Застосування першого закону термодинаміки до ізопроцесів*
- ▶ *Адіабатний процес*
- ▶ *Необоротність теплових процесів. Другий закон термодинаміки*

ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. Спираючись на результати численних експериментів, отримані в середині XIX ст., Дж. Джоуль, Ю. Майєр та Г. Гельмгольц установили закономірність, згідно з якою кількість енергії в природі незмінна, вона лише переходить від одних тіл до інших або перетворюється з одного виду в інший.

Це твердження називають законом збереження і перетворення енергії. Цей закон може бути застосованим і до теплових процесів.

Закон збереження і перетворення енергії, поширений на теплові явища, називають першим законом термодинаміки.

Перший закон термодинаміки має загальний характер і застосовується до всіх без винятку явищ природи: механічне переміщення з тертям, нагрівання тіл, проходження електричного струму, світлові явища, радіоактивні перетворення хімічних елементів тощо. Всі наведені приклади супроводжуються виконанням роботи чи теплопередачею.

У загальному випадку під час переходу системи (газу) з одного стану в інший внутрішня енергія змінюється одночасно за рахунок і виконання роботи, і передавання теплоти. Для такого випадку перший закон термодинаміки можна сформулювати таким чином:

Зміна внутрішньої енергії системи ΔU у випадку переходу її з одного стану в інший визначається сумою роботи зовнішніх сил A' і кількості теплоти Q , переданої системі.

$$\Delta U = Q + A'.$$

Враховуючи, що $A' = -A$, перший закон термодинаміки можна записати й у такому вигляді:

$$Q = \Delta U + A.$$

Тобто підведена до системи кількість теплоти частково йде на збільшення її внутрішньої енергії і частково на виконання системою роботи над зовнішніми тілами.

Історичне встановлення цього закону було пов'язане зі спробами створення машини, яка б нескінченно довго виконувала роботу без надходження теплоти ззовні. У термодинаміці таку машину називають «вічним» двигуном першого роду. Оскільки в цьому випадку

$$Q = 0, \text{ то } A = -\Delta U,$$

тобто робота може виконуватись лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії.

Звідси випливає неможливість побудови «вічного» двигуна першого роду — оскільки неможливо нескінченно довго виконувати роботу за рахунок скінченного значення внутрішньої енергії якоїсь системи.

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРШОГО ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМІКИ ДО ІЗОПРОЦЕСІВ. За допомогою першого закону термодинаміки можна робити важливі висновки про характер процесів, що відбуваються.

Якщо термодинамічною системою є ідеальний газ і його об'єм не змінюється (ізохорний процес), то $A' = 0$, а зміна внутрішньої енергії, згідно з першим законом термодинаміки дорівнюватиме кількості теплоти: $\Delta U = Q$.

Якщо $T = \text{const}$ (ізотермічний процес), внутрішня енергія системи не змінюється ($\Delta U = 0$). Уся передана газу кількість теплоти витрачається на виконання газом роботи над зовнішніми тілами: $Q = A$.

Кількість теплоти Q , передана газу за сталого тиску (ізобарний процес), витрачається на зміну його внутрішньої енергії і на виконання ним роботи над зовнішніми тілами: $Q = \Delta U + A$.

АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС. Серед теплових процесів важливе теоретичне і практичне значення має адіабатний процес.

Адіабатний процес — процес, що відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

Звичайно, неможливо оточити систему оболонкою, що абсолютно не пропускає тепло, але іноді можна вважати реальні процеси дуже близькими до адіабатних. Для цього вони мають здійснюватися так швидко, щоб за час процесу не відбулося теплообміну. Нагрівання повітря від швидкого стискання застосовується у двигунах Дизеля.

Коли працюють потужні компресори, які стискають повітря, температура повітря настільки підвищується, що доводиться спеціально охолоджувати циліндри. Адіабатичне охолодження газу під час їх розширення використовують у машинах для зрідження газів.

Адіабатичні процеси відбуваються з величезними масами газу (наприклад, в атмосфері Землі). Нагріте повітря піднімається вгору і розширюється (оскільки у верхніх шарах менший атмосферний тиск). Це розширення супроводжується охолодженням, яке викликає конденсацію водяної пари й утворення хмар.

Перший закон термодинаміки для адіабатного процесу має вигляд: $\Delta U = A'$, оскільки $Q = 0$, то змінити внутрішню енергію системи можна лише за рахунок виконання над нею роботи.

НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. Закон збереження і перетворення енергії твердить, що кількість енергії за будь-яких її перетворень незмінна, але нічого в

ньому не вказує на те, які енергетичні перетворення можливі. Однак багато процесів, цілком допустимих з погляду закону збереження енергії, ніколи не відбуваються насправді. Наприклад, нагріте тіло, поступово охолоджуючись, передає свою енергію більш холодним тілам, які його оточують. Зворотний процес передачі теплоти від холодного тіла до гарячого самовільно відбуватися не може. Таких прикладів можна навести безліч. Отже, всі процеси в природі мають певну спрямованість і у зворотному напрямі вони самовільно відбуватися не можуть.

Усі процеси в природі необоротні. Напрямок можливих енергетичних перетворень вказує другий закон термодинаміки, який був сформульований на основі дослідних фактів Клаузіусом.

Неможливо перевести теплоту від більш холодної системи до більш гарячої, якщо не відбувається інших одночасних змін в обох системах або тілах, які їх оточують.

! Головне в цьому параграфі

Перший закон термодинаміки. Зміна внутрішньої енергії системи ΔU у випадку переходу її з одного стану в інший визначається сумою роботи зовнішніх сил A' і кількості теплоти Q , переданої системі.

$$\Delta U = Q + A'.$$

Адіабатний процес — процес, що відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

Другий закон термодинаміки. Неможливо перевести теплоту від більш холодної системи до більш гарячої, якщо не відбувається інших одночасних змін в обох системах або тілах, які їх оточують.

? Запитання для самоперевірки

1. Як формулюють закон збереження енергії в термодинаміці?
2. Як записують і формулюють перший закон термодинаміки?
3. Як записується перший закон термодинаміки для ізотермічного, ізохорного, ізобарного й адіабатного процесів?
4. Який процес називають адіабатним? За яких умов він здійснюється? Наведіть приклади адіабатних процесів.
5. Який процес називають оборотним?
6. У чому полягає фізичний зміст другого закону термодинаміки? Як формулюють цей закон?

Вправа до § 36

- 1(с). Газу передано кількість теплоти 100 Дж, і зовнішні сили виконали над ним роботу 300 Дж. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу?
- 2(с). Для ізобарного нагрівання 800 молів газу на 500 К їм було надано 9,4 МДж теплоти. Визначте роботу газу, а також приріст його внутрішньої енергії.
- 3(д). На скільки змінилася енергія 10 моль одноатомного газу під час його ізобарного нагрівання на $\Delta T = 100$ К? Яку роботу виконав при цьому газ і яку кількість теплоти йому було надано?

- 4(в).** У циліндрі під поршнем перебуває газ, об'єм якого дорівнює 200 см^3 , а температура становить $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Маса поршня дорівнює $0,6 \text{ кг}$, площа — 50 см^2 . Визначте роботу, яка витрачається на підняття поршня при нагріванні газу до $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Зовнішній тиск дорівнює 98 кПа . Тертям можна знехтувати.

§ 37. Теплові двигуни

- ▶ *Тепловий двигун*
- ▶ *ККД ідеальної теплової машини*

ТЕПЛОВИЙ ДВИГУН. Технічний та технологічний прогрес людства значною мірою пов'язаний зі створенням та експлуатацією теплових двигунів.

Теплові двигуни — пристрої, які перетворюють внутрішню енергію в механічну роботу.

Незважаючи на різноманітність видів теплових двигунів, усі вони мають загальний принцип дії:

- 1) у будь-якому тепловому двигуні відбувається перетворення внутрішньої енергії в механічну роботу;
- 2) для роботи теплового двигуна потрібні нагрівник, охолоджувач і робоче тіло. У процесі роботи теплового двигуна робоче тіло забирає від нагрівника певну кількість теплоти Q_1 і перетворює частину цієї теплоти в механічну роботу, а не перетворену частину теплоти Q_2 передає охолоджувачу. За законом перетворення і збереження енергії: $Q_1 = Q_2 + A'$;
- 3) робота будь-якого теплового двигуна полягає у повторюванні циклів зміни стану робочого тіла.

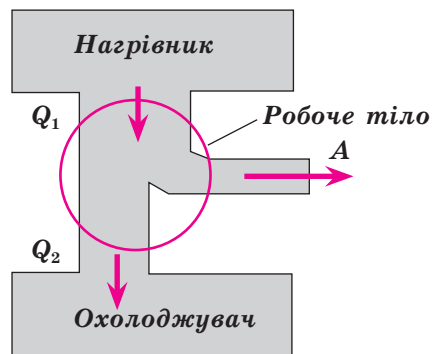
Схематично принцип дії теплової машини показано на мал. 37.1.

Неможливість повного перетворення внутрішньої енергії газу у роботу зумовлена необоротністю теплових процесів у природі. Корисна робота, яку виконує двигун:

$$A = Q_1 - Q_2,$$

де Q_1 — кількість теплоти, яку отримало робоче тіло від нагрівника; Q_2 — кількість теплоти, віддана охолоджувачу.

Коефіцієнт корисної дії для будь-якої теплової машини дорівнює від-



Мал. 37.1.
Схема теплової машини

ношенню корисно використаної енергії до витраченої енергії:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \text{ або } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%.$$

ККД ІДЕАЛЬНОЇ ТЕПЛОВОЇ МАШИНИ. Питаннями підвищення ККД теплового двигуна займався французький інженер Саді Карно.

З'ясовуючи, за яких умов при замкнутому процесі можна отримати максимальний ККД, він запропонував використовувати цикл, який складається з двох ізотермічних і двох адіабатних процесів. Вибір саме цих процесів зумовлений тим, що робота газу при ізотермічному розширенні здійснюється за рахунок внутрішньої енергії нагрівника, а при адіабатному процесі за рахунок внутрішньої енергії газу, який розширюється.

У цьому циклі не можлива теплопередача без здійснення роботи. Цикл Карно — найефективніший з усіх можливих і має максимальний ККД. Відповідно, тепловий двигун, який працював би за циклом Карно, був би ідеальним.

Максимальне значення ККД теплових двигунів, дія яких відбувається за циклом Карно, обчислюється за формулою:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%,$$

де T_1 — температура нагрівника; T_2 — температура холодильника. Зверніть увагу, що цю формулу можна використовувати лише для обчислення ККД ідеальної теплової машини.

Принцип дії ідеальної теплової машини зображено на мал. 37.2.

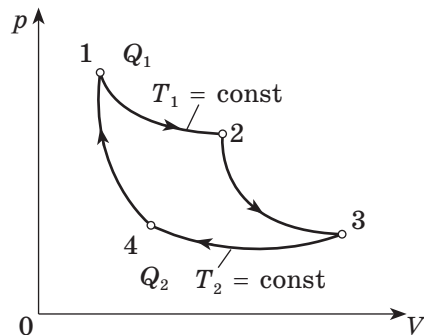
У результаті газ одержить від нагрівника теплоту Q_1 і виконає супроти зовнішніх сил роботу $A_{1,2}$. Після переходу газу в стан 2 контакт робочого тіла (газу) з нагрівником переривається. За умови наявності теплоізолюваної оболонки газ адіабатно розширюється до стану 3.

При цьому газ виконує роботу $A_{2,3}$ супроти зовнішніх сил за рахунок своєї внутрішньої енергії і охолоджується від температури T_1 до T_2 .

Після досягнення газом стану 3 газ ізотермічно стискається при температурі T_2 . У результаті адіабатного стиснення 4–1 газ набуде вихідного стану. Робота, яку виконує газ, чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої ізотермами й адіабатами.



Саді Карно
(1796 — 1832),
французький фізик та
математик



Мал. 37.2.

Графічне зображення циклу ідеальної теплової машини

Аналізуючи формулу для обчислення максимального значення ККД можна виявити напрями удосконалення довільних теплових машин:

- збільшуючи температуру нагрівника T_1 ;
- зменшуючи температуру холодильника T_2 .

Очевидно, що ККД теплової машини міг би дорівнювати одиниці, якби була можливість використати холодильник із температурою $T_2 = 0\text{ К}$. Але абсолютний нуль температури — недосяжний. Холодильниками для реальних теплових двигунів переважно є атмосферне повітря або вода за температури $T \approx 300\text{ К}$. Тому основний спосіб підвищення ККД теплових двигунів — це підвищення температури нагрівника. Але її не можна підняти вище температури плавлення тих матеріалів, з яких виготовляється тепловий двигун. Наприклад, температура нагрівника сучасної парової турбіни наближається до 850 К і максимально можливе значення ККД становить майже 65% .

! Головне в цьому параграфі

Теплові двигуни — пристрої, які перетворюють внутрішню енергію палива в механічну енергію.

Коефіцієнт корисної дії для будь-якої теплової машини дорівнює відношенню корисно використаної енергії до витраченої енергії:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \text{ або } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%,$$

де Q_1 — кількість теплоти, яку отримало робоче тіло від нагрівника; Q_2 — кількість теплоти, віддана охолоджувачу.

Максимальне значення ККД теплових двигунів, дія яких відбувається за циклом, Карно обчислюється за формулою:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%,$$

де T_1 — температура нагрівника; T_2 — температура холодильника.

? Запитання для самоперевірки

1. Що називають тепловим двигуном?
2. Що називають нагрівником, охолоджувачем? Яка їхня роль у роботі теплового двигуна?
3. Що називають робочим тілом?
4. За якою формулою визначають роботу, виконану двигуном?
5. Що називають ККД теплового двигуна?
6. За якою формулою визначають ККД ідеальної теплової машини (ККД машини Карно)?

Вправа до § 37

- 1 (с). Теплова машина за один цикл отримує від нагрівника кількість теплоти 100 Дж і віддає холодильнику 60 Дж . Чому дорівнює ККД теплової машини?
- 2 (с). Визначте максимальне значення ККД, яке може мати теплова машина з температурою нагрівання $227\text{ }^\circ\text{C}$ і температурою холодильника $27\text{ }^\circ\text{C}$.

- 3 (д). Ідеальна тепла машина має ККД $\eta = 60\%$. У скільки разів кількість теплоти, що одержує робоче тіло від нагрівника, більша за кількість теплоти, що віддає робоче тіло охолоджувачу?
- 4 (д). Температура нагрівника теплової машини $200\text{ }^\circ\text{C}$. Яка температура охолоджувача, якщо за рахунок 4 кДж енергії, що отримується від нагрівника, ідеальна машина виконує роботу $1,6\text{ кДж}$?

§ 38. Теплові машини

- ▶ Двигуни внутрішнього згоряння
- ▶ Холодильні машини

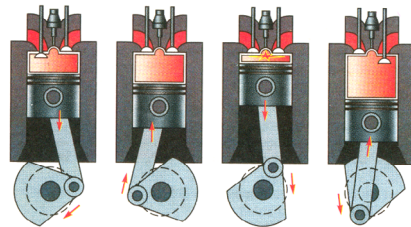
ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ. Одним із найпоширеніших видів теплової машини є двигун внутрішнього згоряння, який використовується в різних транспортних засобах, зокрема в автомобілях.

Розрізняють карбюраторні й дизельні (названі на честь їх винахідника, німецького інженера Р. Дизеля) двигуни внутрішнього згоряння.

Найбільш поширені чотиритактні двигуни внутрішнього згоряння (мал. 38.1): основним його елементом є циліндр із поршнем, де відбувається згоряння палива (звідси походить назва двигуна). Як правило, їх декілька. Тому говорять про дво-, чотири- чи восьмициліндрові двигуни тощо.

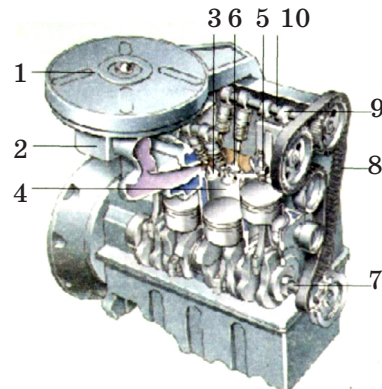
В автомобілях найчастіше використовуються чотирициліндрові двигуни внутрішнього згоряння. Робота циліндрів узгоджується так, що в кожному з них по черзі здійснюється робочий хід і колінчастий вал увесь час дістає енергію від одного з поршнів. На мал. 38.2 зображено розріз такого двигуна.

Німецький інженер Р. Дизель у 1892 р. запропонував новий тип двигуна внутрішнього згоряння, який він побудував у 1897 р. Двигун названий на честь винахідника дизельним двигуном. Він одразу ж набув широкого використання як економічний і надійний, простий в обслуговуванні та експлуатації. Це також поршневий двигун, але тільки повітря (а не паливо-повітряна суміш) заходить у циліндр при першому такті поршня. По-



Впуск Стискування Робочий хід Випуск

Мал. 38.1. Схема роботи чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння



Мал. 38.2. Розріз чотирициліндрового двигуна внутрішнього згоряння

ршень піднімається і стискає повітря до дуже високої температури. У цей момент насос вприскує паливо, і через високу температуру повітря, воно загорається. Поки воно горить, поршень опускається вниз (робочий хід).

Дизельний двигун відрізняється від бензинового більшою потужністю, економічністю і на сьогодні більшою екологічністю.

ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА. Холодильною називають машину, яка за рахунок зовнішньої роботи здійснює передачу теплоти від тіла з нижчою температурою T_2 до тіла з вищою температурою T_1 .

У холодильних машинах робоче тіло (спеціальна речовина фреон) забирає тепло Q_2 від охолоджувача (від морозильної камери і продуктів) і передає тепло Q_1 нагрівнику (кімнаті) (мал. 38.3).

Ефективність дії холодильної машини визначається холодильним коефіцієнтом, який вимірюється відношенням теплоти, відведеної в оборотному циклі від робочого тіла, до виконаної зовнішньої роботи:

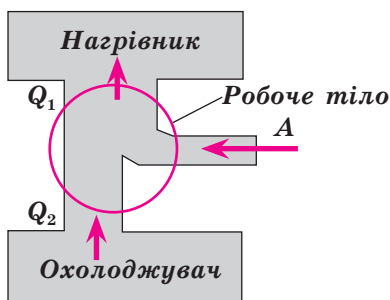
$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A}.$$

Цей коефіцієнт може бути більшим за 1. Він залежить від різниці температур нагрівника T_1 і охолоджувача T_2 .

У домашніх умовах користуються переважно парокompресорними холодильниками, що складаються з двох трубчастих змієвиків і компресора (мал. 38.4).

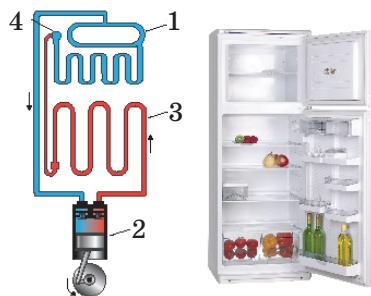
Змієвик 1 разом із розширювальною трубкою 4 і реле з біметалевою пластинкою, яка періодично вмикає компресор, знаходиться в морозильній камері. Змієвик 3 знаходиться на задній стінці корпусу холодильника. Знизу розміщений компресор 2, який приводиться в рух електродвигуном.

У циліндрі компресора газ зазнає стиснення, що приводить до підвищення його температури і тиску. Частина тепла Q_1 через змієвик 3 передається кімнаті. Під час переходу з вузької частини трубки в широку 4 газ зазнає різкого розширення й охолодження та на певний час перетворюється на рідину, яка після відбирання кількості теплоти Q_2 від



Мал. 38.3.

Схема дії
холодильної машини



Мал. 38.4. Схема

парокompресорного побутового
холодильника

продуктів у морозильній камері знову перетворюється у газ. За низького тиску газ нагнітається в циліндр компресора, де знову виконується робота A зі стискання газу і все знову повторюється.

До холодильних машин належать і кондиціонери (мал. 38.5).

Наразі широко використовуються пристрої, які можуть виконувати функцію обігріву й охолодження. Перемикачем можна змінити функцію залежно від пори року.

Спосіб обігріву за допомогою холодильної машини, яка буде забирати тепло від атмосфери, обігрівачи приміщення, запропонував свого часу англійський фізик В. Томсон (лорд Кельвін), назвавши свій пристрій тепловим насосом. Теплові насоси за рахунок виконуваної роботи та теплоти, що відбирається із середовища (з меншою температурою), нагрівають тіла, які мають вищу температуру. Робота теплового насоса полягає в тому, що за рахунок теплоти джерела з низькою температурою, наприклад, води у водоймищах чи свердловинах, у випарнику випаровується робоче тіло з низькою температурою кипіння (аміак, фреон). Далі речовина стискається компресором, при цьому температура речовини підвищується. Потім пара надходить до конденсатора, де перетворюється в рідину. В процесі конденсації пара віддає теплоту рідині, що циркулює в опалювальній системі. Потім робоче тіло повторює свій цикл. Використання теплового насоса для обігріву приміщень є економічно вигідним.



Мал. 38.5.

Кондиціонер — теплова машина

! Головне в цьому параграфі

Одним із найпоширеніших видів теплової машини є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). Розрізняють карбюраторні й дизельні двигуни внутрішнього згоряння.

Холодильною називають машину, яка за рахунок зовнішньої роботи здійснює передачу теплоти від тіла з нижчою температурою T_2 до тіла з вищою температурою T_1 .

? Запитання для самоперевірки

1. Які існують види двигунів внутрішнього згоряння?
2. Назвіть процеси, що відбуваються в чотиритактному двигуні внутрішнього згоряння.
3. У чому полягає відмінність дизельного двигуна внутрішнього згоряння від карбюраторного?
4. Яку машину називають холодильною? Опишіть робочий цикл холодильної машини.

§ 39. Екологічні проблеми, пов'язані з використанням теплових машин

- ▶ *Екологічні проблеми теплової енергетики*
- ▶ *Подолання енергетичної кризи*

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ. Широке застосування теплових машин для добування зручної у використанні енергії найбільше впливає на навколишнє середовище порівняно з усіма іншими видами виробничих процесів, адже з їх допомогою виробляється майже 80 % електроенергії.

Досягненню високих температур нагрівника заважає неповне згоряння палива, зокрема, у двигунах внутрішнього згоряння. Це спричиняє екологічні проблеми.

За законами термодинаміки, електричну і механічну енергію неможливо виробляти без відведення в навколишнє середовище значних кількостей теплоти. Це може призвести до підвищення середньої температури на Землі і створити загрозу підвищення рівня Світового океану.

Під час спалювання палива атмосфера забруднюється попелом, азотистими та сірчаними сполуками, шкідливими для здоров'я людей. Особливо істотне це забруднення у великих містах і промислових центрах. Більше половини всіх забруднень атмосфери створює транспорт. Крім оксиду вуглецю, викидаються в атмосферу 2—3 млн. т свинцю. Сполуки свинцю додають в автомобільний бензин для запобігання детонації палива в двигуні, тобто дуже швидкого згоряння палива.

З метою зменшення таких викидів дедалі більше випускається автомобілів, у яких замість бензинових використовують дизельні двигуни, у паливо яких не додають сполук свинцю. Однак найперспективнішими вважаються електромобілі та автомобілі, які працюють на водні. Продуктом згоряння у водневому двигуні є звичайна вода.

Застосування теплових двигунів призводить до значного споживання кисню, який виробляється зеленими рослинами (10—25 %), через що його кількість у повітрі постійно зменшується. Широке використання теплових машин у житті людини призвело до загострення екологічних проблем, пов'язаних із викидами в атмосферу шкідливих речовин. Серед них особливе місце належить діоксиду карбону CO_2 , який небезпечний тим, що створює «парниковий ефект», унаслідок чого температура повітря на Землі підвищується.

У природі порушується динамічна рівновага для відновлення кисню в реакціях фотосинтезу. Якщо не вживати жодних заходів щодо поліпшення екологічної ситуації, це може призвести до жахливих катастроф, які загрожуватимуть усьому людству. Тому останнім часом пропонуються заходи, спрямовані на зменшення викидів CO_2 в атмосферу.

Застосування парових турбін на електростанціях потребує відведення великих площ під ставки, в яких охолоджується відпрацьована пара. Зі збільшенням потужностей електростанцій різко зростає потреба у воді. Для економії площ і водних ресурсів споруджуються комплекси електростанцій, насамперед атомних, із замкнутим циклом водопостачання.

Одним із заходів захисту довкілля є встановлення різноманітних фільтрів як на теплових станціях, так і на автомобільних двигунах. Розробляються нові зразки газотурбінних, роторних і навіть парових двигунів.

ПОДОЛАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ. Екологічні проблеми використання теплових машин не обмежуються лише їхнім конструктивним удосконаленням з метою зменшення шкідливих викидів. Важливим є також відновлення енергетичних запасів, які витрачаються в процесі людської діяльності. Адже корисні копалини утворюються природою впродовж віків, а витрачаються практично миттєво. Їхні запаси не безмежні й вимагають раціонального використання. В Україні основним джерелом енергоресурсів (83,4 %) залишаються теплові електростанції, що працюють на вугіллі, нафті або газі. Частка атомної енергетики дорівнює 16,1 %; менше 1 % становлять відновлювані джерела енергії. Світові тенденції розвитку енергетики вказують на те, що в життєдіяльності людини треба шукати альтернативні джерела, які ґрунтуються на відтворюваних природних ресурсах: воді, сонці, вітрові тощо.

Перспективним є підвищення коефіцієнта корисної дії теплових машин за рахунок винайдення нових сумішей палива, удосконалення конструкції двигунів, використання теплових насосів тощо.

Зменшує теплові втрати пряме перетворення теплової енергії в електричну за допомогою потужних магнітогідродинамічних генераторів (МГД-генераторів), які набудуть значного поширення. У них тепла енергія плазми перетворюється в електричну.

Ефективним є використання нетрадиційних джерел енергії. Серед них — вітроенергетичні установки, сонячні батареї, біодизельні установки тощо. Сировиною для отримання біопального у кліматично-географічних умовах України є ріпак. З гектара олійстого ріпаку можна одержати майже одну тону біодизельного пального.

Запобігти енергетичній кризі та екологічній катастрофі може і кожен із вас, турбуючись про раціональне використання енергії у школі та побуті.

! Головне в цьому параграфі

Неповне згоряння палива, зокрема у двигунах внутрішнього згоряння, спричиняє екологічні проблеми.

Одним із заходів захисту довкілля є встановлення різноманітних фільтрів як на теплових станціях, так і на автомобільних двигунах.

Енергетична криза зумовлюється використанням енергетичних ресурсів, запаси яких вичерпуються і не відновлюються. Ефективним є використання нетрадиційних джерел енергії (вітроенергетичні установки, сонячні батареї, біодизельні установки).

? Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає негативна дія теплових машин на довкілля?
2. Які методи захисту довкілля наразі використовуються?
3. Якими є шкідливі наслідки від роботи теплоелектростанцій?

4. Чи сприяє підвищення коефіцієнта корисної дії теплових машин зниженню рівня забруднення довкілля?
5. Чому людству слід економити вугілля, нафту та іншу сировину, а не спалювати її для отримання теплової енергії?
6. Які ви знаєте альтернативні джерела енергії?
7. Назвіть нетрадиційні способи одержання та перетворення енергії?
8. Назвіть приклади високоефективних джерел і перетворювачів енергії.

Вправа до § 39

- 1 (с). Теплова машина за один цикл отримує від нагрівника кількість теплоти 100 Дж і віддає холодильнику 60 Дж. Визначте ККД машини (η %).
- 2 (с). Газ отримав кількість теплоти 300 Дж, його внутрішня енергія збільшилась на 200 Дж. Яку роботу при цьому виконав газ?
- 3 (д). Мідне тіло, нагріте до 100 °С, помістили у воду, маса якої дорівнює масі цього тіла. Теплова рівновага настала при температурі 30 °С. Визначте початкову температуру води.
- 4 (д). У посудину поклали лід масою 10 кг при температурі -20 °С. Визначте масу води в посудині після того, як її вмісту надали кількість теплоти 2 МДж.
- 5 (в). У вертикальному циліндрі під важким поршнем перебуває кисень масою 2 кг. Визначте збільшення внутрішньої енергії кисню при підвищенні його температури на 5 К та отриману газом кількість теплоти.

ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ №8

У процесі розв'язування задач із термодинаміки переважно використовуються рівняння закону збереження і перетворення енергії з урахуванням формул зміни внутрішньої енергії та механіки.

Уміння ефективно застосовувати закон збереження енергії до конкретних фізичних процесів — основна складність під час розв'язування задач про теплові явища. Особливу увагу треба звернути на відмінність між кількістю теплоти, зміною внутрішньої енергії, роботою й на вибір системи тіл (чи тіла), для якої складається основне рівняння термодинаміки. Нерідко виникають ускладнення під час математичних обчислень, пов'язаних із перетворенням одного виду енергії в інший. Потрібно пам'ятати, що в рівнянні першого закону термодинаміки $Q = \Delta U + A$ (1) усі величини мають бути виражені в однакових одиницях.

Задачі про зміну внутрішньої енергії тіл можна поділити на три групи. У задачах першої розглядають такі явища, де в ізольованій системі під час взаємодії тіл змінюється лише їхня внутрішня енергія без здійснення роботи над зовнішнім середовищем. Одні тіла, що беруть участь у теплообміні, охолоджуються, інші — нагріваються. Згідно із законом збереження і перетворення енергії (1) для тіл, внутрішня енергія яких

зменшується, можна записати: $Q_{\text{від}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n = \sum_{i=1}^n \Delta U_i$ (2),

оскільки ні тілами, ні над ними робота не здійснюється. Аналогічно

для тіл, енергія яких зростає, матимемо: $Q_{\text{отр}} = \Delta U_1^1 + \Delta U_2^1 + \dots + \Delta U_n^1 = \sum_{i=1}^n \Delta U_i^1$

(3). Із визначення поняття кількості теплоти і закону збереження енергії випливає, що: $Q_{\text{від}} = Q_{\text{отр}}$ (4).

Рівняння (4) є наслідком першого закону термодинаміки в ізольованій системі тіл, де відбуваються лише процеси теплопередачі, внутрішня енергія системи не змінюється і, отже, алгебраїчна сума зміни енергії окремих тіл дорівнює нулю. Залежність (4) називають рівнянням теплового балансу, яке зазвичай слугує основним розрахунковим співвідношенням для задач першої групи. Наведемо орієнтовний алгоритм їх розв'язування:

— прочитавши умову задачі, треба встановити, в яких тілах внутрішня енергія зменшується, а в яких — зростає. Особливу увагу слід звернути на те, чи відбуваються в процесі теплообміну агрегатні перетворення речовини;

— скласти рівняння (2) для тіл, енергія яких зменшується, і (3) — зростає та порівняти їх. Записуючи рівняння теплового балансу у вигляді (4), треба від більшої температури тіла віднімати меншу і здійснювати алгебраїчне додавання величин. У задачах на теплообмін передбачається, що теплопровідність тіл, що взаємодіють, нескінченно велика і тому передача енергії між ними здійснюється миттєво.

У задачах другої групи розглядаються явища, пов'язані з перетворенням одного виду енергії в інший під час взаємодії двох тіл. Результат такої взаємодії — зміна внутрішньої енергії одного тіла внаслідок виконаної ним або над ним роботи. Теплообмін між тілами, як правило, не враховують (адіабатний процес). Тоді рівняння закону збереження і перетворення енергії має вигляд: $0 = \Delta U + A$ (5). Розв'язування таких задач зручно здійснювати за таким алгоритмом:

— аналізуючи умову задачі, треба передусім встановити, у якого з двох тіл, що взаємодіють, змінюється внутрішня енергія і що є причиною зміни — виконання роботи самим тілом або над ним. Крім того, слід переконатися, що в процесі взаємодії теплота до системи ззовні не підводиться;

— записати рівняння (5) для тіла, у якого змінюється внутрішня енергія під час здійснення роботи з урахуванням ККД: $A = \eta \Delta U$ (6) — робота виконується самим тілом; $\eta A = \Delta U$ (7) — над ним;

— склавши рівняння (5), треба знайти вирази A і ΔU . Роботу знаходимо з таких співвідношень: $A = F \cdot s$; $A = N \cdot \tau$; $A = W_2 - W_1$. Щоб знайти ΔU , використовуємо такі формули: $\Delta U = q \cdot m$ (згорання палива); $\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta t + \lambda \Delta m$ (нагрівання і плавлення тіла); $\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta t + r \Delta m$ (нагрівання і випаровування). Підставляючи в початкове рівняння замість A і ΔU їх вирази, одержимо співвідношення для визначення шуканої величини. Якщо в умовах задачі наводяться додаткові умови, то до основного рівняння додають допоміжні;

— виписати числові значення відомих даних, перевірити число невідомих і розв'язати систему рівнянь відносно шуканої величини.

У задачах третьої групи розглядається взаємодія трьох і більше тіл, у процесі якої до одного з них підводиться певна кількість теплоти, вна-

слідок чого змінюється його внутрішня енергія і здійснюється робота. Для розв'язання подібних задач потрібно скласти повне рівняння закону збереження і перетворення енергії (1).

Приклади розв'язування задач

Задача 1. У закритому мідному калориметрі масою 0,2 кг міститься 1 кг льоду за температури -10°C . У калориметр впускають 0,2 кг пари, що має температуру 110°C . Яка температура встановиться в посудині? Питому теплоємність пари в інтервалі від 100 до 110°C прийняти рівною $1,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$. Питома теплота пароутворення води при 100°C дорівнює $2,1 \text{ МДж/кг}$, питома теплота плавлення льоду — $0,34 \text{ МДж/кг}$.

Дано:

$$m_m = 0,2 \text{ кг}; m_n = 0,2 \text{ кг};$$

$$m_l = 1 \text{ кг}; t_l = -10^\circ\text{C};$$

$$t_n = 110^\circ\text{C}$$

$$c_l = 2,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}} = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

$$c_v = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

$$c_n = 1,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}} = 1700 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

$$c_m = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

$$r = 2,1 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 2,1 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$\lambda = 0,34 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$\theta = ?$

встановленої температури θ — на $c_v m_n (t_k - \theta)$. Тоді внутрішня енергія гарячого тіла — пари зменшиться на

$$\Delta U_1 = c_n m_n (t_n - t_k) + r m_n + c_v m_n (t_k - \theta) = Q_{\text{від}}.$$

Отримавши виділену енергію, калориметр нагрівається від початкової температури, що дорівнює температурі льоду t_l , до кінцевої — θ ; його внутрішня енергія збільшується на величину $c_m m_m (\theta - t_l)$. Крім того, частина енергії пари передається льоду, енергія якого теж зростає — під час нагрівання від початкової t_l до температури плавлення $t_0 = 0^\circ\text{C}$ на

Розв'язок

Прийmemo систему «пара — лід — калориметр» за ізолювану і вважатимемо, що з довкіллям її теплообмін нескінченно малий, а тому ним можна знехтувати. У такій системі внутрішня енергія залишається незмінною, оскільки $Q = 0$ і $A = 0$.

Основним рівнянням, що описує процес теплової взаємодії між тілами системи, є рівняння теплового балансу з урахуванням агрегатних перетворень. У задачі приймається, що $m_n r \gg m_l \lambda$. Тому можна припустити, що встановлена в калориметрі температура води вища за 0°C . У процесі взаємодії із кригою й калориметром внутрішня енергія пару зменшується: під час охолодження від початкової t_n до температури конденсації $t_k = 100^\circ\text{C}$ на величину $c_n m_n (t_n - t_k)$, конденсації пари — на $r m_n$, подальшому охолодженні утвореної води від початкової t_k до

величину $c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_{\text{л}})$, у процесі плавлення — на $\lambda m_{\text{л}}$ і під час подальшого нагрівання утвореної води — на $c_{\text{в}}m_{\text{л}}(\theta - t_0)$. Тоді внутрішня енергія холодних тіл зростає на

$$\Delta U_2 = c_{\text{м}}m_{\text{м}}(\theta - t_{\text{л}}) + c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_{\text{л}}) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}(\theta - t_0) = Q_{\text{отр}}.$$

Оскільки $\Delta U_1 = \Delta U_2$, то рівняння теплового балансу за таких умов матиме вигляд:

$$\begin{aligned} c_{\text{п}}m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) + rm_{\text{п}} + c_{\text{в}}m_{\text{п}}(t_{\text{к}} - \theta) = \\ = c_{\text{м}}m_{\text{м}}(\theta - t_{\text{л}}) + c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_{\text{л}}) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}(\theta - t_0) \end{aligned}$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно θ і підставляючи числові значення величин, знаходимо:

$$\theta = \frac{c_{\text{п}}m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) + rm_{\text{п}} + c_{\text{в}}m_{\text{п}}t_{\text{к}} + c_{\text{м}}m_{\text{м}}t_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}t_0 - c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_{\text{л}}) - \lambda m_{\text{л}}}{c_{\text{в}}(m_{\text{п}} + m_{\text{л}}) + c_{\text{м}}m_{\text{м}}};$$

$$\theta \approx 37 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Відповідь: $\theta \approx 37 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аналізуючи отриманий результат, зазначимо, що за досить великої маси пару $m_{\text{п}}$ встановлена температура θ може виявитися більшою за початкову $t_{\text{п}}$, а такого в природі не може бути. Такий результат пояснюється тим, що під час охолодження в процесі теплообміну пара не повністю конденсується і при встановленій температурі одночасно можуть існувати дві фази речовини: рідина і пара. Так і при досить великій масі льоду $m_{\text{л}}$ рівноважні стани системи можуть бути найрізноманітнішими і результат задачі виявиться невірогідним. У процесі агрегатних перетворень речовини рівняння теплового балансу не завжди можна записати в загальному вигляді, оскільки він залежатиме від числових значень заданих величин. Щоб не здійснювати зайвих обчислень у сумнівних випадках, коли заздалегідь неможливо встановити кількість утворених агрегатних станів речовини, рекомендується виконати попередні арифметичні дії — знайти, яка кількість теплоти Q_1 потрібна для нагрівання холодного тіла до температури відповідного перетворення (плавлення або кипіння) і скільки теплоти Q_2 може віддати гаряче тіло під час охолодження або повної конденсації (кристалізації). Якщо виявиться, що $Q_1 > Q_2$, то після перерозподілу енергії утвориться одна фаза речовини, якщо ж $Q_1 < Q_2$, то за температури, що встановилася, речовина перебуватиме у двох фазах — у вигляді пари і рідини (рідини і льоду). Спрогнозувавши на основі попередніх арифметичних дій результат теплообміну, можна скласти остаточне рівняння теплового балансу, з якого й визначається шукана величина.

Задача 2. Свинцева куля, що летить із швидкістю $v_1 = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, потрапляє в сталеву плиту і рикошетить від неї зі швидкістю $v_2 = 300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Яка частина кулі розплавиться, якщо її температура в момент удару дорівнює $t_1 = 107^\circ\text{C}$ і на нагрівання кулі витрачається 80% роботи, що здійснюється під час удару? Питомі теплоємність і теплота плавлення свинцю відповідно дорівнюють: $c = 126 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$; $\lambda = 25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Дано:

$$v_1 = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 126 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

$$\lambda = 25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$t_1 = 107^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 327^\circ\text{C}$$

$$\eta = 0,8$$

$$\frac{\Delta m}{m} - ?$$

Розв'язок

У процесі удару кулі об плиту збільшується її внутрішня енергія внаслідок зменшення кінетичної. Куля нагрівається до температури плавлення і частково плавиться без теплообміну з довкіллям ($Q = 0$), оскільки час удару нескінченно малий. Згідно із законом збереження і перетворення енергії маємо $0 = \Delta U + \eta A$, або $-\eta A = \Delta U$, де η — коефіцієнт, що показує, яка частина механічної енергії витрачається під час нагрівання й агрегатного перетворення свинцю. Якщо в момент удару куля має кінетичну енергію $W_1 = \frac{mv_1^2}{2}$, а після — $W_2 = \frac{mv_2^2}{2}$, то робота сили пружності плити під час удару становить: $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$. У процесі нагрівання кулі від початкової t_1 до температури плавлення t_2 і подальшому плавленні

свинцю масою Δm її внутрішня енергія збільшується на величину $\Delta U = cm(t_2 - t_1) + \lambda \cdot m$. Підставляючи вирази для A і ΔU у вихідну формулу, отримаємо рівняння енергетичного балансу у вигляді:

$$\eta \left(\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2} \right) = cm(t_2 - t_1) + \lambda \Delta m. \text{ Відношення } \frac{\Delta m}{m}, \text{ що показує, яка частина}$$

$$\text{на кулі розплавилася, дорівнює: } \frac{\Delta m}{m} = \left[\frac{\eta(v_1^2 - v_2^2)}{2} - c(t_2 - t_1) \right] \frac{1}{\lambda}; \frac{\Delta m}{m} \approx 0,05.$$

$$\text{Відповідь: } \frac{\Delta m}{m} \approx 0,05.$$

Задача 3. Кисень O_2 масою 6 г за температури 30°C розширюється при постійному тиску, збільшуючи власний об'єм удвічі внаслідок надходження теплоти ззовні. Знайти роботу розширення газу, зміну його внутрішньої енергії і надану кількість теплоти.

Дано:

$$m = 6 \text{ г} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$T_1 = 303 \text{ К}$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$c = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$M = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

 $A - ?$
 $\Delta U - ?$
 $Q - ?$
Розв'язок

Зміна внутрішньої енергії кисню під час нагрівання на ΔT становить $\Delta U = cm\Delta T$ (1), де c — його питома теплоємність за постійного об'єму; $\Delta T = T_2 - T_1$ — зміна температури; T_1 і T_2 — початкова й кінцева температури газу. Оскільки розширення кисню здійснюється при постійному тиску p , то, використовуючи закон Гей-Люссака $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, знаходимо кінцеву температуру кисню: $T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1} = \frac{2V_1 T_1}{V_1} = 2T_1$ (2). Підставляючи вираз (2) в (1), отримуємо:

$$\Delta U = cm(T_2 - T_1) = cm(2T_1 - T_1) = cmT_1;$$

$$\Delta U = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 303 \text{ К} \approx 1,67 \text{ кДж}.$$

Знайдемо роботу розширення газу, враховуючи, що $p = \text{const}$: $A = p(V_2 - V_1) = p(2V_1 - V_1) = pV_1$ (3). Із рівняння Клапейрона — Менделєєва $pV_1 = \frac{m}{M}RT_1$ знаходимо $V_1 = \frac{mRT_1}{p}$ (4). Підставляючи вираз (4) у (3),

одержимо

$$A = p \frac{mRT_1}{Mp} = \frac{mRT_1}{M}; A = \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 303 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \approx 473 \text{ Дж}.$$

З першого закону термодинаміки обчислюємо кількість теплоти, надану газу: $Q = \Delta U + A = (1670 + 473) \text{ Дж} \approx 2,14 \text{ кДж}$.

Відповідь: $\Delta U \approx 1,67 \text{ кДж}$; $A \approx 473 \text{ Дж}$; $Q \approx 2,14 \text{ кДж}$.

Задача 4. Ідеальна холодильна машина, що працює за зворотним циклом Карно, передає тепло від холодильника з температурою 0°C кип'ятильнику з температурою 100°C . Яку масу води треба заморозити в холодильнику, щоб перетворити в пару 1 кг води в кип'ятильнику?

Дано:

$$m_1 = 1 \text{ кг}$$

$$t_1 = 100^\circ \text{C}$$

$$t_2 = 0^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 373 \text{ К}$$

$$T_2 = 273 \text{ К}$$

$$\lambda = 335 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 3,35 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$r = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

 $m_2 - ?$
Розв'язок

ККД ідеальної холодильної машини обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{273}{100} = 2,73. \text{ Кількість теплоти,}$$

що віддається холодильнику — $Q_2 = \lambda m_2$,

де λ — питома теплота плавлення льоду.

Кількість теплоти, що приймається кип'ятильником, — $Q_1 = r m_1$, де r — питома теплота пароутворення.

Запишемо іншу формулу для обчислення ККД: $\eta = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$.

Звідси знаходимо $\eta(Q_1 - Q_2) = Q_2$. Обчислюємо $Q_1 = \frac{Q_2(1 + \eta)}{\eta}$ або

$$rm_1 = \frac{\lambda m_2(1 + \eta)}{\eta}. \text{ Тоді: } m_2 = \frac{rm_1 \eta}{\lambda(1 + \eta)}; m_2 = \frac{2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 2,73}{3,35 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} (1 + 2,73)} = 4,94 \text{ кг}.$$

Відповідь: $m_2 = 4,94 \text{ кг}$.

Задачі для самостійного розв'язування

- 1 (п). Що станеться з рівнем води в склянці, де плаває шматок льоду, коли він розплавиться?
- 2 (п). Коли лід може бути нагрівачем?
- 3 (п). Із однакової висоти впали два тіла однакової маси — мідне й залізне. Яке з них під час удару нагрівається до вищої температури?
- 4 (с). Азот N_2 масою 200 г нагрівається на 100°C спочатку ізобарно, а потім ізохорно. Яка кількість теплоти витрачається в кожному із процесів?
- 5 (с). У посудині міститься 20 г азоту N_2 і 32 г кисню O_2 . Знайдіть зміну внутрішньої енергії суміші газів під час охолодження на 28°C .
- 6 (с). Тиск азоту в посудині об'ємом 3 л після нагрівання зріс на 2,2 МПа. Визначте кількість теплоти, надану газу.
- 7 (с). Під час розширення одноатомного газу від 0,2 до $0,5 \text{ м}^3$ його тиск зріс від 404 до 808 кПа. Знайдіть роботу газу, кількість підведеної до нього теплоти і зміну внутрішньої енергії.
- 8 (с). В ідеальній тепловій машині кількість теплоти, отриманої від нагрівача, дорівнює 6,3 кДж. 80 % цієї теплоти передається холодильнику. Знайдіть ККД машини і її роботу за один цикл.
- 9 (д). Змішали 24 л води при 12°C і 40 л — при 80°C . Визначте кінцеву температуру суміші, якщо під час змішування теплові втрати становили 420 кДж.
- 10 (д). У калориметр, що містить 270 г води при 12°C , опустили шматок алюмінію масою 200 г, нагрітий до 100°C . Температура теплового рівноваги — 23°C . Визначте питому теплоємність алюмінію, якщо теплоємність калориметра становить 42 Дж/К.
- 11 (д). Свинцева куля летить із швидкістю 200 м/с. На скільки зміниться температури кулі, якщо вся її енергія використовується на нагрівання?
- 12 (д). Паровий молот масою 10 т вільно падає з висоти 2,5 м на залізну болванку масою 200 кг. На її нагрівання використовується 30% кількості теплоти, виділеної під час удару. Скільки разів падав молот, якщо температура болванки підвищилася на 20°C ?
- 13 (д). Тепловоз масою 213,5 т, що рухається зі швидкістю 72 км/год, зупиняється. Яка кількість теплоти виділяється під час гальмування?
- 14 (д). Яку потужність розвиває велосипедний двигун, якщо при швидкості руху 25 км/год витрати бензину становлять 1,7 л на 100 км шляху? ККД двигуна — 20 %.

- 15 (д).** Температура термометра, зануреного у воду масою 6,7 г, підвищується на 14,6 °С. Яка температура води на початку вимірювання, якщо показники термометра дорівнюють 32,4 °С? Його теплоємність — 1,92 Дж/К.
- 16 (д).** У чашці міститься 500 г льоду за температури 0 °С. У неї наливають 200 г води, нагрітої до 80 °С. Яка встановиться температура суміші і що міститиметься в чашці?
- 17 (д).** Вантажний автомобіль, обладнаний газогенераторним двигуном потужністю 92 кВт з ККД 18 %, працює в повне навантаження. Визначте масу дров з питомою теплою згоряння 12,5 МДж/кг, потрібних для подолання шляху 1 км із швидкістю 18 км/год.
- 18 (д).** Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно й отримує від нагрівача 2,512 кДж теплоти. Температура нагрівача $T_1 = 400$ К, холодильника $T_2 = 300$ К. Знайдіть роботу A , яку виконує машина і кількість теплоти, що віддається холодильнику за один цикл.
- 19(д).** Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно. Здійснюючи за один цикл роботу $A = 2,94$ кДж, віддає холодильнику 13,4 кДж теплоти. Знайдіть ККД циклу.
- 20 (д).** Ідеальна теплова машина, працюючи за циклом Карно, здійснює роботу $A = 73,5$ кДж. Температура нагрівача $t_1 = 100^\circ\text{C}$, холодильника $t_2 = 0$ °С. Знайдіть ККД циклу, кількість теплоти Q_1 , яку отримує машина від нагрівача, і кількість теплоти Q_2 , яку віддає холодильнику за один цикл.
- 21 (д).** Ідеальна теплова машина, працюючи за циклом Карно, отримує від нагрівача 6,28 кДж теплоти. 80 % теплоти, отриманої від нагрівача, вона передає холодильнику. Знайдіть ККД машини і роботу, здійснювану за один цикл.
- 22 (д).** ККД тепловозу дорівнює 30 %. Визначте витрати нафти за годину, якщо він розвиває потужність 736 Вт.
- 23 (в).** Три рідини, що хімічно не взаємодіють, масами 1, 10 і 5 кг налили в калориметр і надали їм 1,3 МДж теплоти. Початкові температури рідин і їхні питомі теплоємності рівні відповідно: 6 °С, -40 °С і 60 °С та 2, 4 і 2 кДж/(кг·К). Яка температура суміші?
- 24 (в).** Вода може перебувати при температурах, менших 0 °С і вищих 100 °С. У калориметрі теплоємністю 1,67 кДж/К міститься переохолоджена вода масою 1 кг за температури -10 °С. Яка температура встановиться в калориметрі, якщо в нього влити 170 г води, перегрітої до 120 °С?
- 25 (в).** У воду масою 1 кг при 20 °С помістили невелику кількість мокрого снігу масою 250 г. Коли весь сніг розтанув, загальна температура суміші становила 5 °С. Визначте кількість води в грудці снігу, якщо його питома теплота плавлення — 334 кДж/кг.
- 26 (в).** У латунний калориметр масою 125 г опускають шматок льоду масою 0,1 кг. Температура калориметра і льоду рівна -20 °С. Скільки води за температури 20 °С потрібно долити в калориметр, щоб половина льоду розтанула? Питома теплоємність латуні — 0,38 кДж/(кг·К), льоду — 2,1 кДж/(кг·К), питома теплота плавлення льоду — 334 кДж/кг.
- 27 (в).** Двигун витрачає 25 кг бензину за годину й охолоджується водою, різниця температур якої на вході й виході становить 15 К. Визначте

секундну витрату води, якщо на її нагрівання надходять 30% енергії під час згорання палива.

- 28 (в).** Холодильник має потужність 416 Вт, щосекундні втрати енергії в навколишній простір становлять 840 Вт. За який час можна заморозити в ньому 3,6 кг води, температура якої дорівнює 20 °С? Питома теплота плавлення льоду — 0,33 МДж/кг, питома теплоємність води — 4,2 кДж/(кг · К).

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ (№7)

- 1 (п).** Як змінюється внутрішня енергія тіла якщо його температура підвищується?

А Збільшується

Б Зменшується

В У газоподібних тіл збільшується, рідких і твердих — не змінюється

Г У газоподібних тіл не змінюється, рідких і твердих — збільшується

- 2 (п).** Газ не виконує роботи під час:

А Ізотермічного процесу

В Ізохорного процесу

Б Ізобарного процесу

Г Адіабатного процесу

- 3 (п).** Установіть відповідність між величинами та формулами для їх визначення назвами формул, що стосуються термодинаміки, і власне формулами.

1 Внутрішня енергія.

2 Робота газу в ізобарному процесі.

3 Перший закон термодинаміки.

4 ККД теплового двигуна

А $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%$.

Б $A_r = p\Delta V$.

В $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$.

Г $\Delta U = Q$.

Д $\Delta U = Q + A$

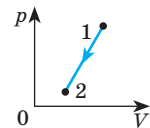
- 4 (п).** На малюнку зображено графік певного процесу для даної маси ідеального газу. Укажіть правильне твердження.

А Перехід газу зі стану 1 у стан 2 супроводжується підвищенням температури.

Б Коли газ переходить зі стану 1 у стан 2, внутрішня енергія газу збільшується.

В Робота газу в процесі переходу із стану 1 у стан 2 додатна.

Г У процесі переходу газу зі стану 1 у стан 2 газ віддає певну кількість теплоти.



- 5 (п).** Серед наведених тверджень, що характеризують процеси плавлення й кристалізації, укажіть правильне:

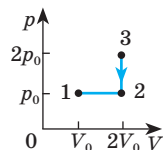
А Кожна речовина має певну температуру плавлення.

Б У процесі плавлення кристалічного тіла температура тіла це змінюється.

В У процесі плавлення внутрішня енергія тіла не змінюється.

Г У процесі кристалізації поглинається певна кількість теплоти.

- 14 (д).** У процесі ізобарного нагрівання на 159 К газ масою 3,47 кг виконав роботу, що дорівнює 144 кДж. Визначте молярну масу газу.
- 15 (д).** Для ізобарного нагрівання газу, кількість речовини якого — 800 моль, на 500 К йому передали 9,4 МДж теплоти. Визначте приріст його внутрішньої енергії.
- 16 (д).** Визначте кількість теплоти, необхідну для переведення одного моля одноатомного ідеального газу зі стану 1 у стан 3 (малюнок). У стані 1 його температура становить 300 К.
- 17 (д).** Для ізобарного нагрівання 50 моль газу на 200 К йому надали 520 кДж теплоти. Яку роботу виконав газ? Якою є зміна його внутрішньої енергії?
- 18 (д).** Азот N_2 , початковий тиск якого становить $1,01 \cdot 10^5$ Па і об'єм — 10 л, розширюється ізотермічно, збільшуючи об'єм у два рази. Знайдіть роботу газу.
- 19 (в).** Визначте мінімальну швидкість, з якою мають летіти назустріч одна одній дві однакові краплинки води, щоб під час зіткнення повністю випаруватися. Температура краплинок перед зіткненням 20 °С. У внутрішню енергію краплинок перейшло 50% механічної.
- 20 (в).** Лід масою 20 кг при -20 °С занурили в 20 л води при 7 °С. Чи весь лід розплавиться?



ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Під час проведення дослідів у фізиці виконують спеціальні вимірювання.

Перед тим, як виконувати вимірювання фізичних величин будь-яким приладом, визначають ціну поділки його шкали.

Ціна поділки шкали аналогового вимірювального приладу — різниця значень вимірюваної величини, що відповідає двом сусіднім позначкам шкали.

У фізиці розрізняють два типи вимірювань — прямі та непрямі (опосередковані)

Абсолютна похибка засобу вимірювань — різниця між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності похибок проведення вимірювання.

Якщо позначити через l істинне значення довжини бруска, l_B — результат вимірювання, то значення величини, одержане в результаті вимірювання, записують у вигляді: $l = l_B \pm \Delta l$.

Похибку вимірювання можна виразити у відсотках відносно числового значення вимірюваної величини. Для цього потрібно визначити відношення абсолютної похибки до вимірюваної величини і знайдене число помножити на 100 %: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$.

Відносна похибка (вимірювання) — відношення абсолютної похибки до умовно істинного значення вимірюваної величини.

Для більш точного визначення фізичної величини вимірювання виконують кілька разів (3–5) і знаходять середнє значення вимірюваної величини за формулою:

$$a_c = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n},$$

де a_c — обчислене середнє значення величини; a_1, a_2, \dots, a_n — значення окремих вимірювань; n — число вимірювань.

Деякі формули для обчислення похибок наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Деякі формули для обчислення похибок

Вид функції	Абсолютна похибка	Відносна похибка
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x \pm y}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	
$f = x \cdot y$	$\Delta f = x\Delta y + y\Delta x$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	$\Delta f = \frac{x\Delta y + y\Delta x}{y^2}$	
$f = x^n$	$\Delta f = nx^{n-1} \cdot \Delta x$	$\varepsilon_f = n\varepsilon_x$
$f = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$	$\Delta f = \frac{\Delta x}{x^2} + \frac{\Delta y}{y^2}$	$\varepsilon_f = \frac{\frac{\Delta x}{x^2} + \frac{\Delta y}{y^2}}{\frac{1}{x} + \frac{1}{y}}$

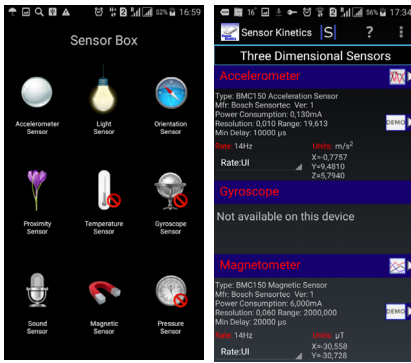
Сучасні смартфони та планшети — це потужні й складні пристрої з безліччю схем, плат і датчиків (мал. 1). Саме використання датчиків може допомогти вам у проведенні навчальних досліджень. Мобільний пристрій дає змогу не просто вимірювати різні параметри навколишнього середовища, а й проводити аналіз і статистичну обробку результатів з допомогою спеціальних додатків. Фактично ми можемо перетворити смартфон у цифровий вимірювальний комплекс.

Перевірити, які датчики містяться у смартфоні чи планшеті, можна за допомогою програми *Sensor Kinetics* чи *Sensor BOX* (мал. 2).

Наявність цього інерційного датчика в планшеті чи смартфоні є важливою, оскільки дає можливість виміряти прискорення одночасно в



Мал. 1. Датчики сучасних смартфонів



Мал. 2. Інтерфейси програм Sensor Box та Sensor Kinetics

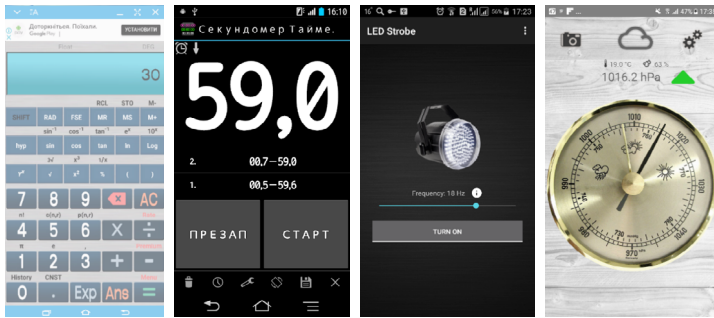
декількох площинах (уздовж осей X , Y , Z). Це допомагає визначити положення пристрою в просторі, встановлюючи кут його нахилу відносно поверхні Землі. Завдяки акселерометру гаджет реагує на перегортання: альбомна орієнтація перетворюється на книжкову і навпаки. Крім того, пристрій реагує на струшування або удар. Прикладом використання такого датчику у навчальній дослідницькій діяльності може бути використання програми

Точність акселерометра виявилася невисокою, тому розробники впровадили в пристрої підтримку гіроскопа. Цей датчик виконує всі ті ж функції, що й попередник, але, на відміну акселерометра, ще вмiє визначити положення нерухомого смартфона. Він також є інерційним датчиком. Гіроскоп — це пристрій, який здатний реагувати на зміну кутів повороту навколо трьох осей координат X , Y , Z , при цьому відстеження переміщення відбувається відносно трьох площин одночасно. Гіроскоп дає змогу визначити орієнтацію пристрою в просторі і пов'язує ці дані з віртуальним світом. Можна використовувати цей датчик для визначення відстаней між об'єктами на місцевості.

Більшість смартфонів оснащені внутрішнім термометром для вимірювання температури модулів смартфона, він необхідний для запобігання перегріву компонентів. Рідше смартфони обладнані барометром. Найчастіше його можна зустріти у флагманських моделях, а також у моделях для екстремальних видів спорту. Також цей датчик можна використовувати за прямим призначенням, тобто для вимірювання тиску. Для цього знадобиться встановити додаток, який можна знайти в Інтернеті.

Розрахунки, що виконуються при обробці результатів експерименту, вимагають використання калькулятора. Для цього можна скористатись інженерним (науковим) калькулятором як окремим приладом і як програмою для смартфонів. Інтерфейси програм різних виробників можуть істотно відрізнитися, але всі вони дають змогу оперувати з числами, представленими в стандартному вигляді.

За допомогою встановленого програмного забезпечення смартфон також можна перетворити на різноманітні прилади, що можна використати під час проведення дослідження. На мал. 3. зображено використання смартфона як наукового калькулятора, секундоміра, стробоскопа, барометра.



Мал. 3. Використання смартфона

ОРІЄНТОВНА ТЕМАТИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи дібрано таким чином, що їх можна виконати без використання складного обладнання та спеціальних експериментальних установок. Залежно від наявного обладнання фізичного кабінету можна тематику лабораторних робіт замінювати на рівноцінні, з урахуванням особливостей побудови процесу навчання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Тема. Оцінка похибок вимірювань.

Мета. Навчитися проводити оцінку абсолютної і відносної похибок прямих і непрямих вимірювань.

Обладнання: лінійка, термометр, мензурка, динамометр, амперметр, вольтметр.

Теоретичні відомості

Якщо результати повторних дослідів у межах точності приладу збігаються, похибку вимірювання вважають рівною половині ціни поділки шкали приладу $\Delta A = \Delta A_{\text{щ}}/2$ (наприклад, похибка вимірювання довжини за допомогою лінійки з міліметровими поділками дорівнює 0,5 мм). Якщо ж розкид результатів повторних дослідів більше $\Delta A_{\text{щ}}/2$ (наприклад, розкид результатів виміру часу часу становить 3 с, тоді як ціна поділки годинника із секундною стрілкою $\Delta A_{\text{щ}} = 1$ с), діють таким чином. За вимірюване значення приймають $A_{\text{сер}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_N}{N}$, де N — число дослідів, а похибку вимірювання, зумовлену випадковими факторами, приблизно оцінюють за формулою:

$$\Delta A_{\text{сер}} = \frac{|A_{\text{сер}} - A_1| + |A_{\text{сер}} - A_2| + \dots + |A_{\text{сер}} - A_N|}{N}$$

За абсолютну похибку вимірювання ΔA приймають більшу з двох величин: $\Delta A_{\text{щ}}/2$ і $\Delta A_{\text{сер}}$.

Один з найпростіших методів оцінювання похибки непрямих вимірів — це метод меж. Він полягає в тому, що за допомогою формули, за якою обчислюється вимірювана величина B , знаходять два значення B_{min} і B_{max} ,

між якими (з великою ймовірністю) перебуває істинне значення вимірюваної величини B .

Розглянемо застосування методу меж на прикладі вимірювання густини. Припустимо, результати прямих вимірювань маси й об'єму такі:

$$m = 30 \text{ г} \pm 0,5 \text{ г}, \quad V = 12 \text{ см}^3 \pm 0,5 \text{ см}^3.$$

Це значить, що $m_{\min} = 29,5 \text{ г}$, $m_{\max} = 30,5 \text{ г}$, $V_{\min} = 11,5 \text{ см}^3$, $V_{\max} = 12,5 \text{ см}^3$.

$$\text{Тоді } \rho_{\min} = \frac{m_{\min}}{V_{\max}} = 2,36 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \quad \rho_{\max} = \frac{m_{\max}}{V_{\min}} = 2,65 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Таким чином, $\rho_{\text{сер}} = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2} = 2,50 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, а похибка вимірювання

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{2} = 0,14 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}. \text{ Тому результат вимірювання можна записати у ви-}$$

$$\text{ді } \rho = 2,50 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \pm 0,14 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Як округляти результати? Якщо помилка округлення більша за абсолютну похибку, округлення зменшує фактично досягнуту точність вимірювання, а якщо помилка округлення менша за абсолютну похибку, останні цифри запису результату будуть недостовірними. Тому округляти результати вимірювань і обчислень треба так, щоб остання значуща цифра перебувала в тому ж десятковому розряді, що й абсолютна похибка вимірюваної величини.

У шкільних лабораторних роботах можна зазвичай обмежуватися двома значущими цифрами.

Хід роботи

1. Виміряйте довжину та ширину зошита і запишіть результати з урахуванням похибки.

2. Обчисліть площу сторінки зошита з урахуванням округлення. Розрахуйте похибку визначення площі методом меж та використовуючи формули (див. табл. 1 на с. 239).

3. Розгляньте наявні фізичні прилади і заповніть таблицю 2.

Таблиця 2

Назва засобів вимірювання	Лінійка	Мензурка	Термометр	Динамометр	Вольтметр	Амперметр
Вимірювана фізична величина						
Одиниці виміру						
Межі вимірювання						
Ціна поділки						
Точність вимірювання						

4. Зробіть висновок: що ви вимірювали і який отримано результат.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема. Визначення прискорення тіла при рівноприскореному русі.

Мета: визначити прискорення, з яким кулька рухається по похилому жолобу; навчитись аналізувати результати експерименту.

Обладнання: металевий жолоб, металева кулька, металевий циліндр, штатив із муфтою і затискачем, мірна стрічка, секундомір.

Теоретичні відомості

Експериментальна установка зображена на мал. 4. Рух кульки по похилому жолобу — приклад прямолінійного рівноприскореного руху тіла. Якщо пускати кульку без початкової швидкості, то залежність її переміщення від часу описується рівнянням:

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

де пройдена кулькою відстань s_x є модулем переміщення, а a_x — шукане прискорення:

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

Хід роботи

1. Зібрати установку для досліду (мал. 4), закріпивши жолоб у похилому положенні (під невеликим кутом до горизонту). Біля нижнього кінця жолоба покласти металевий циліндрик.

2. Визначити відстань s , вимірявши довжину ділянки жолоба від точки пуску кульки до зрізу циліндра. Зробити кілька вимірів, знайти середнє значення і результат занести до таблиці.

3. Визначити час t . Для цього, дочекавшись, коли стрілка секундоміра буде на нульовій (або іншій помітній) поділці, відпускають кульку з верхнього кінця жолоба і помічають час її удару t об циліндрик у нижньому кінці жолоба. Оскільки кулька скочується досить швидко, для точності вимірювання часу t роблять кілька спроб пуску кульки по жолобу (як правило, не менше п'яти) і знаходять середнє значення часу її руху до удару об циліндрик:

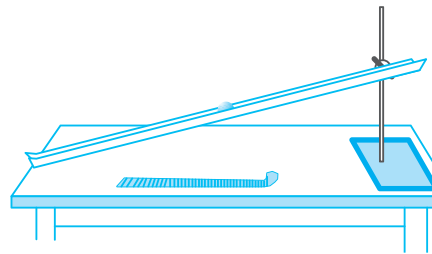
$t_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$. Результат заносять до табл. 3.

4. Обчислити значення $a_{xc} = \frac{2s_x}{t_c^2}$ і записати його в таблицю 3.

Таблиця 3

№ досліду	s , м	t_c , с	a_c , м/с ²
1			
2			

5. Обчислити похибки прямих вимірювань та межі, у яких знаходиться справжнє значення прискорення a .



Мал. 4.

До лабораторної роботи №2

Для оцінювання результату можна вважати $\Delta s = 0,5$ см; $\Delta t = 0,5$ с (половину значення найменшої поділки вимірювального приладу, тобто мірної стрічки та секундоміра відповідно).

Межі значень s та t будуть такими:

$$\begin{aligned} t_{\max} &= t_c + \Delta t; & t_{\min} &= t_c - \Delta t \\ s_{\max} &= s + \Delta s; & s_{\min} &= s - \Delta s \end{aligned}$$

Відповідно межі значень a_{\max} і a_{\min} можна обчислити за формулами:

$$a_{\max} = \frac{2s_{\max}}{t_{\min}^2}; \quad a_{\min} = \frac{2s_{\min}}{t_{\max}^2}.$$

6. Змінити кут нахилу жолоба і повторити досліди. Результати записати до таблиці та знайти прискорення кульки за цих умов. Порівняти одержані значення і зробити висновок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тема. Дослідження руху тіла по колу.

Мета. Ознайомитися з величинами, що характеризують рух тіла по колу.

Обладнання: кулька, підвішена на нитці, штатив з кільцем і муфтами, секундомір або годинник із секундною стрілкою, вимірювальна стрічка або смужка з міліметрового паперу.

Теоретичні відомості

Маятник рівномірно рухається по колу, що лежить у горизонтальній площині. Нитка, на якій підвішений маятник, описує круговий конус. Такий маятник називають конічним (мал. 5). Радіус обертання маятника має бути меншим, ніж відстань від осі обертання до основи штатива. Радіус кола вимірюють мірною стрічкою.

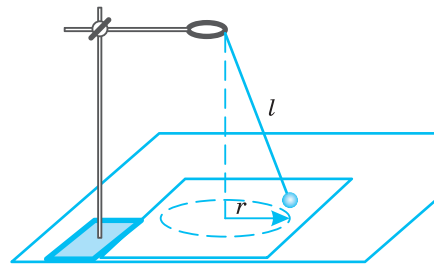
Величини r , t і n визначають прямими вимірюваннями:

r — радіус кола, яке описує обертове тіло;

T — період обертання маятника;

n — кількість обертів за час t .

За допомогою непрямих вимірювань та вивчених вами у § 8 формул, можна визначити період, частоту, лінійну та кутову швидкість, доцентрове прискорення



Мал. 5. Конічний маятник

Хід роботи

1. Виготовте конічний маятник.
2. Верхній кінець нитки маятника прив'яжіть до кільця штатива.
3. Під конічний маятник покладіть на столі вимірювальну стрічку або смужку міліметрового паперу.
4. Помітьте, проти якої поділки висить маятник у стані спокою.
5. Надайте кульці маятника обертального руху.
6. Коли кулька описуватиме коло, помітьте найбільшу віддаль r від місцеположення кульки у стані спокою.
7. Після зазначеної попередньої підготовки одночасно з пуском секундоміра полічіть оберти кульки. «Нуль, один, два...» до n (n може бути 20—25).

8. Аналогічні вимірювання проведіть і для обертання кульки по колу іншого радіуса. Дослід повторіть 2—3 рази.

9. Результати вимірювань і обчислень запишіть до таблиці 4.

Таблиця 4

№ досліду	Радіус кола r , м	Число обертів n	Час t , с	Період T , с	Лінійна швидкість v , $\frac{m}{s}$	Доцентрове прискорення a_d , $\frac{m}{s^2}$

10. Оцініть точність вимірювань та зробіть висновок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Тема. Вимірювання сил.

Мета. Формувати навички вимірювання сили за допомогою динамометра, знаходити рівнодійну, переконатися у справедливості правила паралелограма при додаванні сил, навчитися систематизувати результати спостережень.

Обладнання: два лабораторні штативи, динамометри з відкритою шкалою, набір важків масою по 100 г, тіло невідомої маси (наприклад, дерев'яний брусок), два нерухомі блоки.

Хід роботи

Вимірювання сил, що діють уздовж однієї прямої.

1. Закріпити на штативі корпус динамометра з відкритою шкалою у вертикальному положенні.

2. Позначити початкове положення стрілки динамометра.

3. Підвісити до гачка динамометра тіло невідомої маси і виміряти силу тяжіння, що діє на нього, а також вагу тіла. Варто звернути увагу на те, щоб під час вимірювань тіло перебувало в спокої.

4. Простежити, як змінюються покази динамометра, якщо тіло починає рухатися вгору або донизу. Зробити висновок про величину сили тяжіння та ваги тіла. Висновок записати в зошит.

5. Користуючись результатами вимірювань, розрахувати масу тіла. Визначити об'єм тіла (дерев'яного бруска) та обчислити густину речовини, з якої виготовлено тіло.

6. Результати вимірювань і обчислень записати в зошит.

7. Підвісити до гачка динамометра три тягарці вагою по 1 Н. До гачка верхнього тягарця причепити інший лабораторний динамометр і потягнути за нього вгору, щоб показчик динамометра вказував 1 Н. Зафіксувати значення сили, яку показує динамометр, закріплений у штативі. Зробити висновок про додавання сил, що діють уздовж однієї прямої у протилежних напрямках.

8. Підвісити до гачка динамометра два тягарці вагою по 1 Н. До гачка нижнього тягарця причепити інший лабораторний динамометр і потягнути за нього вниз, щоб показчик динамометра вказував 1 Н. Зафіксувати значення сили, яку показує динамометр, закріплений у штативі. Зробити висновок про додавання сил, що діють уздовж однієї прямої в одному напрямі.

Вимірювання сил, що діють під кутом.

9. Прикріпити тягарці масою по 100 г до кінців нитки, перекинutoї через нерухомі блоки так, щоб на один блок діяла сила 3 Н, а на другий — сила 4 Н (мал. 6).

10. До середини нитки в точці O прикріпити 5 тягарців, дія яких зрівноважить сили, що діють на блоки.

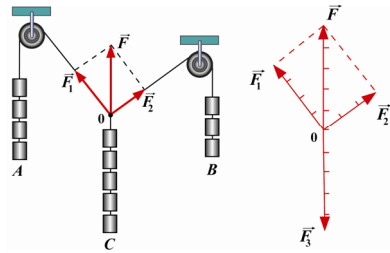
11. Переконатися, що в такому випадку точка O під дією всіх тягарців залишається в спокої, а ліва і права частини нитки розташуються під прямим кутом.

12. На напрямках цих частин нитки відкласти відрізки, пропорційні прикладеним силам 3 і 4 Н.

13. Побудувати на векторах сил паралелограм і визначити рівнодійну силу. Переконатися, що вона дорівнює 5 Н.

14. Записати одержаний результат у зошит.

15. Порівняти рівнодійну і зрівноважувальну сили, зробити висновки.



Мал. 6. Додавання сил, що діють під кутом

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Тема. Вимірювання коефіцієнта тертя.

Мета. Ознайомитися з двома способами визначення коефіцієнта тертя; виміряти коефіцієнт тертя дерева по дереву, переконатися у залежності сили тертя від сили нормального тиску на поверхню.

Обладнання: динамометр, набір тягарців, лінійка, дерев'яний брусок, штатив з муфтами і лапкою, вимірювальна стрічка.

Теоретичні відомості

Перший спосіб полягає у вимірюванні за допомогою динамометра сили, з якою треба рівномірно тягти брусок з тягарцями по горизонтальній поверхні. Ця сила за модулем дорівнює силі тертя $F_{\text{тер}}$, яка діє на брусок. За допомогою того самого динамометра можна знайти силу тяжіння бруска з тягарцем P . Ця сила за модулем дорівнює силі нормального тиску N бруска на поверхню ковзання. Визначивши таким способом значення сили тертя для різних значень сили нормального тиску, можна знайти коефіцієнт

$$\text{тертя: } \mu = \frac{|\vec{F}_{\text{тер}}|}{|\vec{P}|}.$$

Другий спосіб вимірювання коефіцієнта тертя дає змогу визначити дослідним шляхом не сили, а довжини відрізків. Для цього користуються рівномірним рухом бруска по похилій площині. Якби не було тертя, брусок мав би зісковзнути з поверхні вниз.

Однак, при невеликому куті нахилу цього не відбувається, оскільки ковзанняю протидіє тертя спокою F_1 , яка дорівнює складовій сили тяжіння P , і збільшується разом з F_1 зі збільшенням кута нахилу площини. За певного значення кута нахилу α брусок починає рівномірно ковзати вниз по похилій площині. Тепер на нього починає діяти сила тертя ковзання, але, оскільки за абсолютним значенням вона приблизно дорівнює максимальній силі тертя спокою, для визначення коефіцієнта тертя ковзання ми можемо скористатися максимальним значенням сили тертя спокою:

$\mu = \frac{F_1}{F_2}$; але $\frac{F_1}{F_2} = \operatorname{tg} \alpha$. Як видно з мал. 7:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{b}; \text{ Отже, } \mu = \frac{h}{b}.$$

З цієї формули випливає, що для знаходження коефіцієнта тертя достатньо виміряти висоту й основу похилої площини, за яких починається ковзання бруска.

Хід роботи I частина.

1. Покладіть брусок на горизонтально розташовану дерев'яну лінійку. На брусок поставте тягарець.
2. Прикріпивши динамометр горизонтально до бруска, тягнути за нього так, щоб брусок рухався рівномірно вздовж лінійки. Записати при цьому покази динамометра.
3. Зважити брусок і тягарець.
4. За формулою $\mu = \frac{|\vec{F}_{\text{тер}}|}{|\vec{P}|}$ знайти коефіцієнт тертя.
5. Повторити дослід, поступово докладаючи на брусок тягарці.
6. Знайти середнє арифметичне значень коефіцієнтів тертя, визначених у різних дослідах.
7. Знайти похибку кожного з дослідів — різницю між $\mu_{\text{сер}}$ і значеннями μ , одержаними в різних дослідах.
8. Визначити середнє арифметичне похибок дослідів $\Delta\mu_{\text{сер}}$.
9. Скласти таблицю результатів дослідів.

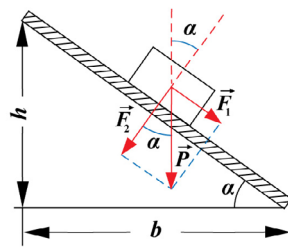
Таблиця 5

№ дослідів	$ \vec{F}_{\text{тер}} $, Н	$ \vec{P} $, Н	μ	$\mu_{\text{сер}}$	$\Delta\mu = \mu_{\text{сер}} - \mu$	$\Delta\mu_{\text{сер}}$

10. Записати результати вимірювань у вигляді $\mu = \mu_{\text{сер}} \pm \Delta\mu_{\text{сер}}$.

II частина

1. Поклавши на лінійку брусок із тягарцями, повільно змінювати її нахил, піднімаючи край лінійки, поки брусок на почне ковзати вздовж похилої площини.
2. Затиснути лінійку в знайденому положенні лапкою штатива і переконатися, що брусок рухається рівномірно.
3. За допомогою вимірювальної стрічки визначити висоту h і основу b похилої площини.
4. Визначити коефіцієнт тертя за формулою $\mu = \frac{h}{b}$.
5. Повторити дослід, змінюючи кількість тягарців на бруску.
6. Знайти середнє арифметичне значень коефіцієнта тертя і середню похибку вимірювань.
7. Скласти таблицю результатів дослідів.



Мал. 7.

Тіло на похилій площині

№ досліду	Кількість тягарців	h , м	b , м	μ	$\mu_{\text{сер}}$	$\Delta\mu$	$\Delta\mu_{\text{сер}}$

8. Записати результати вимірювань у вигляді: $\mu = \mu_{\text{сер}} \pm \Delta\mu_{\text{сер}}$.

9. Порівняти коефіцієнти тертя, знайдені першим і другим способами.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Тема. Визначення центру мас плоских фігур.

Мета. Навчитися визначати центр мас плоских фігур правильної та неправильної форми.

Обладнання: висок, пластини правильної і довільної геометричної форми, штатив з муфтами і лапкою, вимірювальна стрічка, шпилька.

Теоретичні відомості

Для того щоб тіло рухалось поступально під дією сили, необхідно, аби лінія дії цієї сили проходила через точку, яку називають центром мас.

Центр мас — це точка, в якій перетинаються лінії дії сил, що примушують тіло рухатись поступально.

Центром тяжіння називається точка тіла, до якої прикладена сила тяжіння, або точка тіла, до якої прикладена рівнодійна всіх сил тяжіння, що діють на тіло.

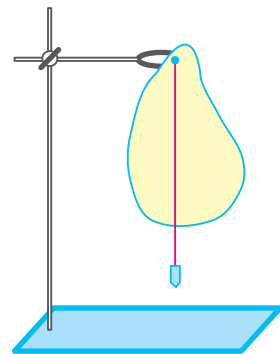
Якщо тіло перебуває в полі дії сили тяжіння, то центр мас збігається з центром тяжіння.

Центр тяжіння є геометричним центром однорідного тіла правильної геометричної форми. Наприклад, центром мас трикутника є точка перетину його медіан. Отже, для того щоб визначити центр тяжіння, слід просто знайти геометричний центр фігури.

Якщо плоску фігуру підвісити в будь-якій точці, вона розташується так, що вертикальна пряма, проведена через точку підвісу (мал. 8), пройде через центр тяжіння. Це дає змогу знайти центр тяжіння плоских фігур дослідним шляхом. Для цього треба, підвісивши пластину в будь-якій точці, накреслити на ній вертикальну пряму, що проходить через точку підвісу. Провівши цю операцію декілька разів, знайти точку перетину цих прямих. Ця точка перетину і буде центром тяжіння пластини.

Для того щоб у цьому впевнитись, пластину можна підвісити в третій точці. Вертикальна пряма, яка проходить через точку підвісу, повинна пройти через точку перетину двох перших прямих. Можна також зрівноважити пластину на вістрі булавки. Пластина перебуватиме в рівновазі, якщо точка опори збігатиметься з центром тяжіння.

Можна також зрівноважити пластину на краю опори, наприклад, на краю парти, і провести через цей край на пластині лінію, тоді повернувши пластину, проробити це вдруге. Перетин цих ліній і дасть шукану точку.



Мал. 8. Експериментальне визначення центру тяжіння

Хід роботи

Визначення центру тяжіння плоскої фігури геометричним способом.

1. Розділіть надану вам геометричну фігуру на дві простіші геометрично правильні частини (прямокутники чи трикутники).

2. Знайдіть центр тяжіння кожної частини.

3. З'єднайте отримані точки відрізком. Здійсніть ці операції знову, виконавши інше розбиття на дві інші фігури правильної геометричної форми, і з'єднайте отримані точки відрізком. Знайдіть точку перетину цих відрізків. Отримана точка — центр тяжіння плоскої фігури.

4. Переконайтесь, що знайдена точка є центром тяжіння. Для цього встановіть пластинку на вістря булавки чи голки, таким чином, щоб знайдений вами центр тяжіння збігався з точкою опори. Якщо ви правильно виконали побудову, то пластинка має перебувати в рівновазі.

Визначення центру тяжіння плоскої фігури експериментально.

5. Закріпіть шпильку в лапці штатива.

6. За допомогою булавки підвісьте пластину і висок (див. мал. 8). Для цього попередньо зробіть отвір у пластині, трохи розширивши його, щоб тіло вільно оберталось навколо цвяха.

7. Олівцем позначте лінію виску на нижньому та верхньому краях пластини.

8. Знявши пластину, проведіть лінію, яка з'єднує позначені точки.

9. Повторіть дослід, підвісивши пластину в іншій точці.

10. Встановіть пластину на голку або шпильку чи олівець, таким чином, щоб точка опори збігалася з визначеним вами центром тяжіння. Якщо пластинка перебуватиме в рівновазі, то знайдена точка і буде центром тяжіння.

11. Зробіть висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Тема. Дослідження руху тіла, кинутого горизонтально.

Мета роботи: перевірити виконання закону збереження імпульсу під час пружного удару двох тіл.

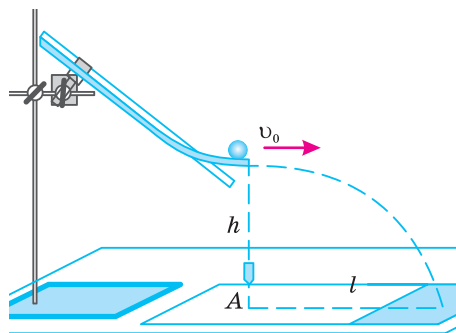
Прилади і матеріали: лінійка з міліметровими поділками; штатив з муфтою і лапкою; жолоб для пускання кульок; металева кулька; лоток з піском, лист фанери.

Хід роботи

1. За допомогою штатива закріпити жолоб. Загнутий кінець жолоба повинен бути розташований горизонтально (мал. 9). На стіл, у місці можливого падіння кульки, покласти лоток з піском.

2. Пустити кульку вільно котитися по жолобу. Повторити дослід п'ять разів, пускаючи кульку з того самого місця жолоба.

4. Виміряти висоту h і дальність польоту l . Обчислити середнє значення початкової швидкості кульки.



Мал. 9. Дослідження руху тіла, кинутого горизонтально

6. Обчислити похибки вимірювань та обчислень та записати результати вашого дослідження до табл. 7.

Таблиця 7

№ досліду	Висота польоту h , м	Дальність польоту l , м	Швидкість кульок v_0 , м/с

7. На аркуші, прикріпленому до фанери, накреслити координатну сітку.

8. Визначивши в попередньому досліді початкову швидкість кульки, запишіть рівняння залежності координати кульки вздовж кожної з осей від часу $x(t)$ та $y(t)$.

9. Використовуючи ці рівняння, теоретично розрахуйте координати та позначте на аркуші паперу відповідні положення кульки через кожні 0,05 с. Через позначені точки проведіть плавну криву, яка і буде траєкторією руху кульки.

10. Прикріпіть аркуш до фанери. Встановіть кульку на вершині жолоба та відпустіть. Переконайтесь в тому, що розрахована і побудована Вами траєкторія близька до реальної і є гілкою параболи.

11. Зробіть висновок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Тема. Дослідження залежності між тиском, об'ємом і температурою газу (експериментальне підтвердження закону Гей-Люссака).

Мета. Експериментально дослідити ізобаричний процес. Експериментально перевірити справедливості закону Гей-Люссака.

Обладнання: скляна трубка, лінійка, посудина з гарячою водою, посудина з водою кімнатної температури, термометр.

Хід роботи

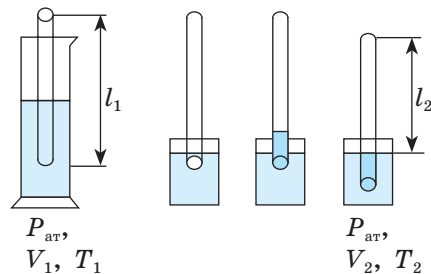
1. Виміряти довжину трубки l_1 (мал. 10).

2. Опустити скляну трубку у посудину з гарячою водою відкритим кінцем догори.

3. Через 3—5 хв виміряти температуру гарячої води ($T_1 = 273 + t_1^\circ$). Потім закривши відкритий кінець трубки пластиліном (або пальцем), вийміть трубку з гарячої води і швидко опустіть у стакан з водою кімнатної температури, прямо під водою зніміть пластилін (палець). У міру охолодження повітря в трубку заходить вода.

4. Після припинення підйому води в трубці опустити її так, щоб рівні води у трубці й стакані були однаковими. Тоді тиск повітря у трубці буде атмосферним. Виміряти довжину стовпа повітря у трубці l_2 і температуру навколишнього середовища t_2° ($T_2 = 273 + t_2^\circ$). Відношення об'ємів

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}$$



Мал. 10. Експериментальна перевірка закону Гей-Люссака

5. Обчисліть відносну (ε) і абсолютну (Δ) похибки

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \text{ де } \Delta l = \frac{C_{\Delta l}}{2}. \Delta_1 = \varepsilon_1 \cdot \frac{l_1}{l_2}, C_{\Delta l} \text{ — ціна поділки лінійки.}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}, \text{ де } \Delta T = \frac{C_{\Delta T^\circ}}{2}. \Delta_2 = \varepsilon_2 \cdot \frac{T_1}{T_2}, C_{\Delta T^\circ} \text{ — ціна поділки термометра.}$$

6. Повторіть п. 2—5 ще два рази.

7. Результати вимірювань і обчислень занесіть до табл. 8:

Таблиця 8

№	l_1 , мм	l_2 , мм	T_1 , К	T_2 , К	$\frac{l_1}{l_2}$	$\frac{T_1}{T_2}$	ε_1	ε_2	Δ_1	Δ_2

8. Порівняти одержані результати:

$$\frac{l_1}{l_2} - \Delta_1 \leq \frac{l_1}{l_2} \leq \frac{l_1}{l_2} + \Delta_1 \text{ та } \frac{T_1}{T_2} - \Delta_2 \leq \frac{T_1}{T_2} \leq \frac{T_1}{T_2} + \Delta_2.$$

Робота виконана правильно і підтверджує правильність закону Гей-Люссака, якщо інтервали чисельних значень у останніх двох формулах перекриваються.

9. Зробіть висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Тема. Вимірювання відносної вологості повітря.

Мета. Вивчити методи вимірювання вологості повітря і виміряти відносну вологість повітря у фізичному кабінеті.

Обладнання: гігрометр психрометричний, психрометрична таблиця, мірна стрічка.

Хід роботи

1. Ознайомитися з будовою приладу, за допомогою якого вимірюватиметься відносна вологість повітря.

2. Зафіксувати покази «вологого» та сухого термометрів і за психрометричною таблицею визначити відносну вологість повітря у приміщенні фізичного кабінету.

3. Повторити дослід.

4. Обчислити абсолютну й відносну похибки вимірювань. Записати здобуті результати з урахуванням похибки вимірювання.

5. Обчислити кількість водяної пари в кімнаті, зробивши додаткові вимірювання.

6. Зробіть висновок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

Тема. Визначення модуля пружності.

Мета роботи: визначити модуль пружності різних речовин.

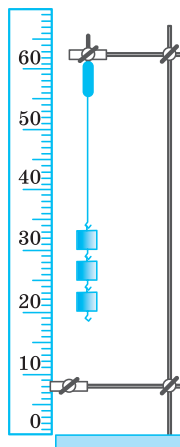
Обладнання: штатив з муфтами і лапкою, гумовий шнур (гумка для грошей), набір тягарців, лінійка з міліметровими поділками.

Хід роботи

1. Закріпити в лапці штативу гумовий шнур (мал. 11).
2. Поряд зі шнуром встановити і закріпити лінійку з міліметровими поділками.
3. Виміряти початкову довжину шнура l .
4. Підвісити тягарець відомої маси m і виміряти викликане ним видовження x .
5. До першого тягарця додати другий, третій тягарці, записуючи щоразу видовження пружини x .
6. Визначити діаметр шнура, використовуючи метод рядів.
7. За даними вимірювань обчислити модуль пружності:

$$E = \frac{mgl}{\pi d^2 x}$$

8. Результати вимірювань та обчислень записати до таблиці:



Мал. 11. До лабораторної роботи №10

Таблиця 9

№ досліду	m , кг	mg , Н	$ x $, м	E , Па

9. За результатами вимірювань побудувати графік залежності сили пружності від видовження шнура x і, користуючись ним, визначити середнє значення жорсткості шнура.

10. Оцінити точність одержаного результату, зробити висновок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

Тема. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу капілярним методом.

Мета. Визначити коефіцієнт поверхневого натягу, дослідити залежність коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації домішок.

Обладнання: капілярна трубка, посудини з рідиною різної концентрації.

Хід роботи

1. Визначте за написами на капілярній трубці її діаметр.
2. Опустіть капіляр у підфарбовану воду (можна використовувати і чисту воду, однак підфарбовану краще видно у капілярі) і виміряйте висоту її піднімання h у капілярі. Вважаючи воду чистою, запишіть у таблицю її густину ρ та висоту h .

3. Обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу води за формулою:

$$\sigma = \frac{\rho ghD}{4}$$

4. Результат обчислень занесіть до табл. 10.

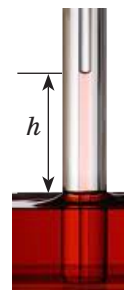
Таблиця 10

ρ , кг/м ³	h , м	D , м	σ , Н/м

5. Виконайте аналіз похибок, допущених при виконанні досліду.

6. Повторіть експеримент скориставшись водними розчинами відомої концентрації.

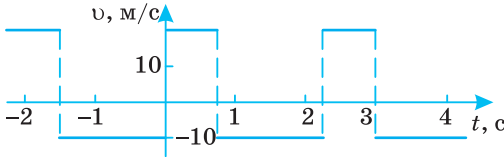
7. Побудувати графік залежності величини коефіцієнта поверхневого натягу розчину від його концентрації та зробити висновок.



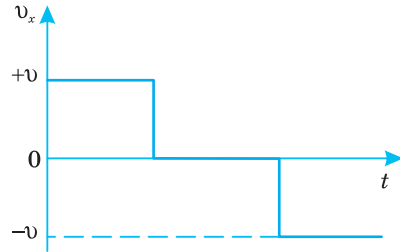
Мал. 12. Капілярна трубка в рідині

ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ ПІСЛЯ ПАРАГРАФІВ

§ 5. 2(д). 30 с; 150 м; 60 м; 4(д). а) -270 м; 0 м; б) 12 м/с, праворуч; 1,5 м/с, ліворуч; в) 20 с, -30 м; 5(д). Див. мал. 1; 6(в). Див. мал. 2.



Мал. 1.



Мал. 2

§ 6. 4(е). 75 км/год; 5(е). $0,25 \text{ м/с}^2$; 6(е). $0,21 \text{ м/с}^2$; 7(д). 50 м/с; 8(д). $-6 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$, $66 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; 9(в). 20 хв; 10(в). 7 км/год. § 7. 1(е). 4 м/с; 2(д). $v_x = 20 - 0,25t$; 3(д). $v = 0,8t$; 6,4 м; 4(д). а) $v_{1x} = 10 + 0,8t$ — прискорений; б) $v_{2x} = 2 - 2t$ — сповільнений, через 1 с прискорений; в) $v_{3x} = -4 + 4t$ — сповільнений, через 1 с прискорений; г) $v_{4x} = -1 - 12t$ — прискорений. § 8. 1(е). 50 с; 2(е). зменшується в 2 рази; 3(д). 1 : 20; 4(д). 1 км/с^2 ; 5(д). $0,5 \text{ м/с}^2$; 6(д). 20 м/с; 7(в) а) 1 : 2; б) 2 : 1. § 9. 1. В; 2. Ні; 3. Завдяки інерції; 5. Ні; 6. Їх швидкість однакова.

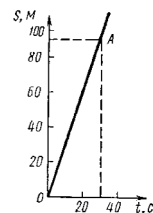
§ 10. 1. $a = \frac{F}{m}$; 2. 1 Н; 3. $9,8 \text{ м/с}^2$; 4. 1:1; 5. 100 г. § 13. 2. 2 мН; 400 кН; 8 Н; 3. 2 мг; 700 кг; 1700 т; 4. 770 Н; 5. Донизу $1,5 \text{ м/с}^2$; 6. 90 кН. § 17. 1(е). 1 м/с; 2(е). $2 \cdot 10^7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; 3(д). 1 м/с, у напрямку руху важчого тіла; 4(д). $16 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$;

$48 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; 5(д). 4,5 кг; під кутом $\alpha = 36,9^\circ$ протилежно до напрямку руху першого осколка. § 18. 3(д). а); б). § 19. 1(е). 7,5 м/с; 2(е). 1 м/с, у напрямку руху важчого тіла; 3(е). $0,9 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; 4(д). $0,17 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; 37,2 мДж; 5(д). 105 Дж. Якщо

маса візка з людиною набагато більша від маси каменя, то вся робота, яку виконує людина, витрачається на те, щоб надати каменю кінетичної енергії; 6(д). 15° ; 7(в). 0,16 м; 58,8 Дж; 8(в). а) $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 0,08 м; б) 0,02 м; 9(д). 1,8 кДж; 10(в). 5,5 м; 11(в). 40%. § 21. 1(д). 0,714 с; 2(д). 1,3 с; 0,93 с; 3(д). 0,994 с; 4(д). 0,662 с; 5(в). $2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; 6(в). у 7,1 рази. § 22. 1(е). В; 2(е). А; 3(е). Д; 4(е). Д; 5(е). В; 6(д) зменшиться у 1,5 рази; 7(д). 22 кг; 8(в). $1,1 \cdot 10^{23}$.

§ 24. 1(е). А; 2(е). Г; 3(е). А; 4(е). А; 5(е). В; 6(д). 267 °С; 7(д). 1300 м/с; 8(в). 10%. § 25. 1(е). В; 2(е). А; 3(е). В; 4(д). Б; 5(д). В; 6(д). 10^{22} ; 7(в). 61 г. § 26. 1(е). В; 2(е). Б; 3(е). Г; 4(д). В; 5(д) 27 °С; 6(д). 4 моль; 7(д). 8,2 МПа; 8(в). $\approx 1 \text{ л}$.

§ 28. 1(п). Б; 2(п). В; 3(е). А; 4(е). В; 5(е). А; 6(е). В; 7(е). 77%; 8(д) 0,3 кПа; 9(д). 0,7 кПа, $5,2 \text{ г/м}^3$; 10(д). не випаде; 11(в) 2 °С; 12(в). 100%. § 29. 1(п). В; 2(п). Б; 5(д). $14,4 \text{ м/с}^2$; 6(д). 74 мН/м; 7(е). 25,6 мкДж; 8(в). 83,8 мН; 9(в). 1,1 см. § 30. 1(п). В; 2(п). Б; 3(е). Г; 4(е). Б; 5(д). 800 кг/м^3 ; 6(д). 5,5 мм; 7(в). 22 мН/м. § 32. 1(е). 0,157 Н; 2(д). $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; 3(д). $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; 4(в). 26,78 м; 5(в). 7,5; § 33. 1(е). 37,4 кДж;



Мал. 2. До задачі 21

2(д). 12,5 кДж; 3(д). 9 МДж; 4(в). Зменшилася в 3 р. § 34. 1(д). 8000 кДж; 2(д). 60 °С; 3(д). 55,75 кг; 4(в). 2412 Дж/кг · °С; 5(в). 105 кДж. § 36. 1(с). 400 Дж; 2(с). 3,3 МДж; 6,1 МДж; 3(д). 12,4 кДж; 4(в). 6,14 Дж. § 37. 1(с). 40%; 2(с). 40%; 3(д). у 2,5 рази; 4(д). 284 К. § 39. 1(с). 40%; 2(с). 100 Дж; 3(д). 23,3 °С; 4(в). $\Delta U = 6492$ Дж; $Q = 9090$ Дж.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

(с. 45). 1(с). Перше тіло наздожене друге через 30 с. $s_{1x} = x_1 = 150$ м; $s_{2x} = x_2 - x_{02} = 60$ м; 2(с). З рис. 2 а випливає, що тіло рухається рівномірно у від'ємному напрямку осі OX , оскільки проекція вектора переміщення на вісь X від'ємна й зростає за абсолютним значенням прямо пропорційно часу; 3(с). $v_2 = 8$ м/с; 4(с). $x = -1,5 \cdot 10^3$ м; $y = 4,5 \cdot 10^3$ м; 5(с). $x = 1,9 \cdot 10^4$ м; $y = 2 \cdot 10^4$ м; 6(с). $s = 5$ м; $s_x = 4$ м; $s_y = 3$ м; 9(д). $v_c \approx 14,7$ м/с; 10(д). $S = 395$ м; $v_{\text{сеп}} \approx 14,1$ м/с; 11(д). $s = 90$ м; 12(д). $a \approx 0,05$ м/с²; $t \approx 53$ с; 13(д). $t = 20$ с; 14(д). $a = 0,8$ м/с²; $s_{10} = 7,6$ м; 15(д). $a \approx 1,6$ м/с²; $v_0 = 5$ м/с; 16(д). $v_{\text{сеп}} \approx 8,2$ м/с; 17(д). $v_{\text{сеп}} \approx 16,7$ м/с; 18(д). $s = -200$ м; $l = 2,2 \cdot 10^3$ м; 19(д). $a = 2,0$ м/с²; $v_{\text{сеп}1} = 20$ м/с; $v_{\text{сеп}2} = 28,6$ м/с; 20(д). $v_2 = 14$ м/с; 23(в). $v_2 = 2,4$ м/с; $\alpha = 0,84$ рад; 24(в). $v_2 \approx 48,3$ м/с; $\varphi \approx 0,078$ рад; 25(в). $\varphi \approx 0,068$ рад; $v \approx 221,7$ м/с; 26(в). $t \approx 17,3 \cdot 10^3$ с; 27(в). $v_{\text{сеп}} \approx 7,6 \cdot 10^3$ м/с; 28(в). $\omega \approx 7,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $v \approx 3,25 \cdot 10^2$ м/с; 29(в). $v \approx 32 \cdot 10^2$ м/с. (с. 63). 1. Ні; 2. Ні;

3. Сили у III закону прикладено до різних тіл; 4. Рухом по інерції; 5. 22,5 Н; 6. 280 м/с; 7. 10 Н; 8. 1 м/с²; 9. 2400 Н; 10. 30 см/с; 11. Одночасно; 12. 0,08 м/с².

(с. 79). 1. у 4 рази; 2. 5600 м; 3. Час не зміниться, дальність збільшиться вдвічі; 4. 78 м; 5. 100 м; 4,5 с; 6. 1,3 м; 1 с; 7. 6 R_3 від центру Місяця; 8. 8,8 м/с²; 9. $6 \cdot 10^{24}$ кг; 10. 7,7 км/с; 95 хв; 11. 15 кН; 12. 45 м; 30 м/с; 13. 2,8 м; 24 м/с; 14. 2 с; 3 м/с; 15. 20 м; 16. 12 м/с; 59°; 17. 180 м; 18. 60 м; 140 м; 19. а) 0,7 с; б) 0,07 с; в) 3,8 м/с; 20. а) 0,45 с; б) 0,05с; в) 24 м/с; 21. 35 м. (с. 89). 3. 9 МН; 4. 0,44; 5. 0,346; 6. 10 Н; 2,5 Н; 7. 150 Н/м; 8. 0,36 Н/м; 9. 40 м; 10. 21 кН; 11. 100 Н; 12. 8 Н; 13. 3,3 м/с²; 14. 15 кН; 15. 20 м/с; 22°; 16. 18 м/с; 17. 440 кН; 110 кН; 18. $\frac{8}{3}m(g+a)$; 19. $\mu_1 \geq \frac{\text{tg} \alpha - \mu}{\mu \text{tg} \alpha + 1}$.

(с. 107). 5. 180 кН; 300 Н; 6. Так; 7. 425 кН; 8. 13,7 см; 9. 10 см від вантажу P_1 ; 10. 5 кН; 11. $\text{tg} \alpha = 2\mu$; 12. На відстані 2,4 м від матері; 13. 14 Н; 14. 240 кг/м³;

15. 222 г; 72 г. (с. 127). 3(п). $v = 20 \frac{\text{М}}{\text{с}}$; 4(с). $v_1 = 0,6$ м/с; 5(с). $m \Delta v = 3,5 \frac{\text{кг} \cdot \text{М}}{\text{с}}$;

6(с). $v = 400$ м/с; 7(с). а) $A_1 = 21$ Дж; б) $A_2 = -64$ Дж; 8(с). $\mu = 0,02$; 9(д). $A = 1,2$ кДж; 10(д). $A = -2,25$ МДж; $s = 375$ м; 11(д). $A = 16,02$ кДж; 12(д). $W_{\text{к}} = W_{\text{п}} = 98$ Дж; 13(д). $W_{\text{к}} = 32,2$ Дж; $W_{\text{п}} = 39,4$ Дж; 14(д). $s_x = 19,1$ м; 15(д). $W_{\text{к}} = 4,9$ Дж; $v = 3,1$ м/с; $s = 10$ м; 16(д). $\mu = 0,06$; 17(д). $u_2 = -12,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$;

18(д). а) $u = 0,67$ м/с; б) $u = 0,87$ м/с; в) $u = 0,5$ м/с; 19(д). $s = 0,3$ м; 20(д). $W_{\text{к}1} = 150$ кДж; 21(д). а) $u_1 = u_2 = 1,8$ м/с; б) $u_1 = 0,6$ м/с; $u_2 = 2,6$ м/с;

22(д). $W_{\text{к}1} = 5,62$ Дж; $W_{\text{к}1}^* = 0,62$ Дж; 23(д). $W_{\text{к}1} = 7,5$ Дж; 24(в). $\frac{w_{\text{к}1}}{w_{\text{к}2}} = 1,25$;

25(в). $h_2 = 0,84$ м; $t = 1,4$ с; 26(в). $t = 0,58$ с; 27(в). $\frac{W_{\text{к}1}}{W_{\text{к}2}} = 1,4$. (с. 175). 1(с). $3,3 \cdot 10^{-27}$ кг;

2(с). $1,1 \cdot 10^{20}$; 3(с). 478 м/с, 48 °С; 4(с). 0 Дж; $2,6 \cdot 10^{20}$ Дж; 5(с). 3 °С; 6(с). 1,1 кг;

8(д). 20 м; 9(д). 897 МПа; 10(д). 2,4 л, 1167 К; 11(д). 1,5 г; 12(д). 550 мг; 13(д). $0,58 \cdot 10^5$ Па; 14(д). 25 см; 15(д). 83 г/м³; 16(д). 1127 °С; 18(д). 90 мл; 19(д). а) збільшиться в 1,5 рази; б) зменшиться в 1,3 рази; 20(д). 60 Н, 40 Н; 21(д). $p_b > p_a$, $V_b > V_a$, $T_a > T_b$; 22(д). 10^{12} ; 23(д). в 1,7 рази; 24(в). $2,8 \cdot 10^{-10}$ м; 25(в). 6,3 кг; 27(в). 392 К; 28(в). 30 м; 29(в). 2 хв; 30(в). 62 кПа. (с. 195) 1(д). $\rho_2 > \rho_1$ в 4,3 рази; 2(д). 74%; 3(д). 2,1 г; 4(д). 18 мН/м; 5(д). 2,5 мДж; 6(д). 4,35 Дж; 7(д). 0,03 мм; 8(д). 1,4 см; 9(в). 18 мН/м; 10(в). $8,5 \cdot 10^{-2}$ Н; 11(в). 7,5 мм, 6 мм; 12(в). 14,9 см, 7,8 мг; 13(д). $\frac{4\pi\sigma^2}{\rho g} = 6,8$ мкДж (с. 234). 1(п). Не зміниться; 2(п). Коли його температура вища за температуру контактуючого тіла; 3(п). Мідне; 4(с). $Q_1 = 27$ кДж; $Q_2 = 21$ кДж; 5(с). $\Delta U = -1,4$ кДж; 6(с). $Q \approx 23$ кДж; 7(с). $A = 182$ кДж; $Q = 667$ кДж; $\Delta U \approx 485$ кДж; 8(с). $\eta = 20\%$; $A = 1,26$ кДж; 9(д). $c \approx 326$ К; 10(д). $c \approx 840$ Дж/(кг·К); 11(д). $\Delta T = 154$ К; 12(д). 25 разів; 13(д). $Q = 42,7$ МДж; 14(д). $N \approx 736$ Вт; 15(д). $t_1 \approx 33,4$ °С; 16(д). $t = 0$ °С; 400 г води і 300 г льоду; 17(д). $m \approx 8,1$ кг; 18(д). $A = 630$ Дж; $Q_2 = 1,88$ кДж; 19(д). $\eta = 18\%$; 20(д). $\eta = 18\%$; $Q_1 = 274$ кДж; $Q_2 = 200$ кДж; 21(д). $\eta = 18\%$; $A = 1,256$ кДж; 22(д). $m \approx 0,19$ кг; 23(в). $t = 6$ °С; 24(в). $t \approx 4$ °С; 25(в). $m_{b2} = 78$ г; 26(в). $m_b = 261$ г; 27(в). $m_c \approx 1,53 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; 28(в). $\tau \approx 1$ год.

ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

(с. 49). 1(п). Б і Г; 2(п). А; 4(с). В; 5(с). Г; 6(с). А; 7(с). А; 8(с). Б; 9(с). В; 10(с). Б; 11(д). В; 12(д). Б; 13(д). Б; 14(в). 1-В, 2-Б, 3-А, 4-Г; 15(д). $a = 5$ см/с²; 17(в). $\Delta S \approx 1,15$ км; 18(в). 9,7 км/гол; 8,3 км/год; 8,6 км/год; 19(в). ; 20(в). 48 км/год (48 км/год); 0 (46 км/год); 21(в). Залежність переміщення від часу зображено прямою OA , тангенс кута нахилу якої до осі t чисельно дорівнює швидкості v . За графіком визначимо, що ліфт досягне висоти 90 м за 30 с. (с. 64). 1. Б; 2. Г; 3. 1-А, 2-Г, 3-Б, 4-Д; 4. А; 5. Б; 6. Б; 7. 20 кН; 8. $x = 20 + 2,475t^2$; 9. 4 Н; 10. 160 Н; (с. 90). 1. Г; 2. Г; 3. 1-А, 2-В, 3-Д, 4-Б; 4. Б; 5. Б; 6. В; 7. 20 м; 8. 4 Н; 2,45 м/с; 9. 163 Н; 10. 0,69. (с. 108). 1. В; 2. Г; 3. 1-А; 2-В; 3-Д; 4-Б; 4. Г; 5. В; 6. 100 Н; 7. 400 Н; 8. 180 м³; 9. 30 см; 10. 100 Н. (с. 129). 1(п). В; 2(п). 1-В; 2-Д; 3-Г; 4-Б; 3(с). 1-Г, 2-А, 3-Д, 4-В; 4(с). 4-Г; 5(с). В; 6(с). А; 7(с). В; 8(с). В; 9(д). Б; 10(д). А; 11(д). Б; 12(д). А; 13(д). Б; 14(д). Г; 15(д). А; 16(д). В; 17(д). 0,5 м/с; 18(д). 6 МВт; 19(д). $W_k = 20$ Дж; $W_n = 60$ Дж; 20(в). $l = 240$ м; 22(в). $\mu = 0,22$; $Q = 5,7$ Дж. (с. 177). 1(п). В; 2(п). 1-В, 2-Д, 3-А, 4-Б; 3(п). 1-Б, 2-Г, 3-В, 4-Д; 4(п). А; 5(с). Б; 6(с). В; 7(с). Г; 8(д). А; 9(д). А; 10(д). Б; 11(д). Г; 12(д). Г; 13(д). В; 14(д). 31 л; 15(д). 0,48 кг/м³; 16(д). 9,5 л; 17(в). 11,44 кПа; 18(в). 15,7 г; 19(д). ≥ 15 см; 20(в). переміститься до низу на 19 см. (с. 236). 1(п). А; 2(п). В; 3(п). 1-В, 2-Б, 3-Д, 4-А; 4(п). Г; 5(п). Б; 6(с). Г; 7(с). В; 8(с). В; 9(с). Б; 10(с). В; 11(д). А; 12(д). А; 13(д). А; 14(д). 0,032 кг/моль; 15(д). 6,1 МДж; 16(д). 17(д). $\Delta U = 437$ кДж; 18(в). $A \approx 0,7$ кДж; 19(в). 3250 м/с; 20(в). Розплавиться 15 кг льоду.

Предметний покажчик

- Аморфні тіла 201, 205
Анізотропія
Атом 144, 145
Атомна одиниця маси 147
Вага 169
Взаємодія 5, 19, 70, 80, 109
Видовження
— абсолютне 81
— відносне 81
Відносна атомна маса 146
Випаровування 80, 144
Внутрішня енергія 208, 209
Вологість повітря 251
Газ 98, 159, 164
Гравітаційне поле 70
Гравітаційна стала 16, 68
Деформація
— пружна 80
— пластична 81
Динаміка 52
Дифузія 150
Другий закон
 термодинаміки 218
Енергія
— кінетична 153, 157
— механічна 120, 121
— потенціальна 153
— внутрішня 208, 209
Жорсткість 83
Закон
— Архімеда 101
— Бернуллі 102
— всесвітнього тяжіння 14, 65, 134
— Бойля-Маріотта 166
— Гей-Люссака 167
— Гука 82
— додавання швидкостей, релятивістський закон 137
— динаміки Ньютона: перший 53, другий 58, третій 59
— збереження імпульсу 109
— Паскаля 99, 100
— Шарля 168
Запас міцності 207
Змочування 190
Ідеальний газ 155
Ізобарний процес 175
Ізопроеци 164
Ізотермічний процес 218
Ізотропія 207
Ізохорний процес 174, 218
Імпульс тіла 109, 130
Інерція 54
Інерціальні системи відліку 54
Йон 144, 145, 150, 151, 154
Капілярність 190
Кількість теплоти 211
Кількість речовини 148
Коефіцієнт поверхневого натягу 187
Кельвін (одиниця термодинамічної температури) 157
ККД замкнутого циклу 221
Конденсація 181
Кристалізація 210
Кристалічна ґратка 202, 203
Кристалічні тіла 201, 204, 207
Маса 56, 58, 66, 70
Маса молекули 158, 179
Межа
— міцності 208
— пружності 207
Механічна
— робота 116, 119
— напруга 206
Модуль Юнга 208
Молекула 145
Момент сили 94
Монокристал 203, 205, 207
Основне рівняння МКТ 162, 163
Пара насичена 181
Перша космічна швидкість 67
Перший закон термодинаміки 217
Питома теплота плавлення 230, 233, 235
Плавлення 235
Поверхневий натяг 143
Полікристали 203, 207
Потужність 116, 119
Прискорення 28, 30, 32
— вільного падіння (гравітаційне) 66, 77
Принцип відносності 133, 134
Галілея-Ньютона 134
Плече сили 94
Реактивний рух 111
Рівновага
— стійка 97
— нестійка 97
— байдужа 97
Рівняння Клапейрона-Менделєєва 164
Робота
— механічна 111
— сили 116
Сила
— натягу 92
— поверхневого натягу 187, 190
— пружності 82
— реакції опори 82
— тяжіння 65, 66
Сполучені посудини 100
Стала Авогадро 179
Статика 92
Температура 180, 201, 212
Тепловий двигун 220
Теплообмін 209, 210, 211
Термодинаміка 214
Тертя
— спокою 117
— ковзання 246
Тиск
— атмосферний 101
— гідростатичний 99
— ідеального газу 209, 216
— насиченої пари 82
Удар
— пружний 109
Умова рівноваги тіла 92
Цикл Карно 221
Центр
— мас 95
— інерції 95
— тяжіння 248
Швидкість
— середня квадратична 159
Шкали температур 157
Штучні супутники Землі 67, 68