

Коршак Є.В.
Ляшенко О.І.
Савченко В.Ф.

ФІЗИКА



8

Рецензенти: *О. В. Сергеев*, доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри
Запорізького державного університету; *М. М. Коміренко*, вчитель-методист фізики
Фахівського ліцею Київської області, заслужений вчитель України

Затверджено Міністерством освіти і науки України
(протокол рішення колегії № 8/1-19 від 26.07.2001)

Увага! ©

Авторські та видавничі права ВТФ «Перун» захищені Законом України
«Про авторське право і суміжні права»

Коршак Є. В. та ін.
К70 Фізика, 8 кл.: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. / Є. В. Коршак,
О. І. Ляшенко, В. Ф. Савченко.—2-ге вид., перероб. та доп.— К.: Ірпінь:
ВТФ «Перун», 2003.— 192 с.: іл.
ISBN 966-569-033-7

ББК 22.3я721

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

§ 1. ТЕПЛОВИЙ СТАН ТІЛ І ТЕМПЕРАТУРА

Упродовж життя ми часто спостерігаємо явища і процеси, що пов'язані з обміном теплоти. Наприклад, передавання теплоти від більш нагрітих тіл менш нагрітим, нагрівання тіл під дією сонячного проміння або внаслідок тертя, отримання теплоти внаслідок згоряння палива тощо. З багатовікового досвіду пізнання світу людство усвідомило численні факти перебігу теплових явищ. Учені узагальнили їх і зробили певні висновки.

Для визначення теплового стану тіла або, як ми кажемо, його температури, людина спочатку послуговувалася своїми відчуттями.

Щоб охарактеризувати ступінь нагрітості тіл, ми вживаємо такі слова, як «холодне», «тепле», «гаряче». Ми кажемо, наприклад, гарячий пісок, холодний лід, тепла вода тощо.

Проте за відчуттями тепловий стан тіл можна оцінювати лише приблизно і у досить обмеженому інтервалі температур. Адже ми не можемо на дотик визначити температуру розжареного металу або надто низьку температуру. Крім того, така оцінка температури буде відносною і не завжди однозначною, оскільки вона залежатиме від сприймання її людиною. На підтвердження цього виконаємо дослід.

Якщо розігрітий камінець кинути у воду, то з часом він охолоне, а вода нагріється; принесений зовні у кімнату лід розтане, утворена вода поступово нагріється, а згодом і випарується; щоб зберегти тепло в оселі, треба домогтися зменшення його втрат тощо

За відчуттями тепловий стан тіл можна оцінювати лише приблизно

Зануримо одну руку в гарячу воду, іншу — в холодну (мал. 1.1, а) і залишимо їх там протягом 1—2 хв. Після цього зануримо обидві руки в посудину з водою кімнатної температури (мал. 1.1, б) і спробуємо за своїм відчуттям установити, яка температура води у цій посудині — холодна чи гаряча? На диво, ми матимемо різні відчуття: рука, яка була в теплій воді, відчуватиме холод, і навпаки, рука, яка перебувала в холодній воді, відчуватиме тепло. Але ж насправді температура води однакова.

Отже, ми пересвідчилися, що за власним відчуттям людина не завжди може однозначно визначити тепловий стан тіла. Для цього їй треба знайти кількісну міру ступеня нагрятості тіла, тобто знайти спосіб об'єктивно визначати, яке з тіл і на скільки тепліше чи холодніше за інше? Щоб можна було це зробити, треба встановити відповідну процедуру вимірювання, тобто встановити спосіб вимірювання температури тіла.

Для вимірювання температури тіл застосовують спеціально призначені вимірювальні прилади, що називаються термометрами.

З'ясуємо, як відбуваються теплові процеси, пов'язані зі зміною температури.

З життєвого досвіду нам відомо, що у природі плин теплових процесів відбувається за певними законами. Так, було помічено, що, по-перше, більш нагріті тіла завжди віддають тепло менш нагрітим, по-друге, температури тіл, які перебувають у певному обмеженому просторі, з часом вирівнюються і стають однаковими.

Справді, що станеться з праскою, якщо її вимкнути з електромережі? Через певний час вона охолоне, а температура в кімнаті дещо підвищиться. Що буде з окропом після того, як чайник зняти з плити? Його температура і температура води поступово зрів-



а



б

Мал. 1.1. Відчуття температури людиною



няються з кімнатною. Якою стане температура молока, якщо його поставити у холодильник? Воно охолоне до такої температури, як усередині холодильника.

Отже, з узагальнення власного досвіду та численних дослідних фактів ми можемо стверджувати, що у природі за звичайних умов перебіг теплових явищ і процесів завжди відбувається у напрямі вирівнювання температур: більш нагріті тіла віддають тепло, остигаючи при цьому, а менш нагріті тіла отримують його і нагріваються. У тіл з однаковими температурами теплообмін не відбувається — вони перебувають у стані теплової рівноваги.

За звичайного перебігу теплових явищ температура тіл, які перебувають у теплообміні, з часом вирівнюється і стає в усіх тіл однаковою. Тобто в процесі теплообміну з часом встановлюється тепла рівновага.

- ?
1. Пригадайте з історії розвитку людства, як первісна людина добувала вогонь? Які зміни теплового стану тіл вона при цьому використовувала?
 2. Наведіть приклади нагрівання чи охолодження тіл і вкажіть, яким із відомих вам способів це зроблено?
 3. Чи може лід віддавати тепло воді, в якій він плаває?

ВПРАВА 1

1. У воді, що знаходиться в термосі, плаває лід. Чи відбуватиметься теплообмін між ними і яким чином, якщо: а) їх температура однакова і дорівнює 0°C ; б) температура льоду становить -10°C , а води 0°C ; в) температура льоду 0°C , а води $+2^{\circ}\text{C}$?
2. Чи можуть у природі відбуватися теплові процеси, коли менш нагріті тіла віддають тепло більш нагрітим, ще більше остигаючи при цьому?

§ 2. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Для кількісного визначення теплового стану тіла необхідно зазначити спосіб вимірювання та міру, за допомогою якої температура тіла може бути охарактеризована

У 1742 р. шведський учений А. Цельсій побудував температурну шкалу і виготовив термометр, яким досі користуються у багатьох країнах світу

певним числом, з різних причин ми не можемо цього зробити, як, наприклад, під час вимірювання довжини чи маси тіла, тобто порівняти вимірювану властивість з еталоном. Тому в основу вимірювання температур покладено інший спосіб — це знаходження функціональної залежності певної властивості тіл від температури і побудова за нею температурної шкали. Наприклад, в основу дії рідинних термометрів (ртутного чи спиртового) покладена залежність об'єму рідини від температури (мал. 1.2).

Рідинний термометр (мал. 1.3) складається з маленької колбочки-резервуара 3 з рідиною (спиртом, ртуттю, пентаном), тонкої капілярної трубочки 2 і шкали 1.

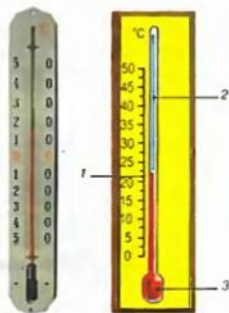
Колбочка контактує з тілом, температуру якого вимірюють. З часом між ними встановлюється теплова рівновага і їхні температури вирівнюються. Рідина в колбочці внаслідок зміни власної температури змінює свій об'єм — розширюється чи стискається. Оскільки ця зміна незначна, щоб її можна було зафіксувати, до колбочки присидіано тонку капілярну трубку. Це дає змогу візуально спостерігати за зміною об'єму рідини, тому що діаметр капілярної трубочки дуже малий.

Щоб кількісно визначити температуру тіла, недостатньо лише зафіксувати зміну об'єму рідини в колбочці. Необхідно також надати їй числове значення, тобто, як кажуть у фізиці, проградувати шкалу приладу. Для цього обирають такі значення температури, які легко відтворити, оскільки вони мають фіксовані значення.

Далі слід установити розмір одиниці температурної шкали — градус, тобто поділити інтервал температур між цими значеннями на цілком певне число, наприклад на 100, як це зробив А. Цельсій. Відтворимо на досліді процес побудови температурної шкали Цельсія.



Мал. 1.2. Різновиди термометрів



Мал. 1.3. Рідинний термометр

При нагріванні ртуті на 100°C об'єм її змінюється лише на 1,8 %, спирту — на 11 %

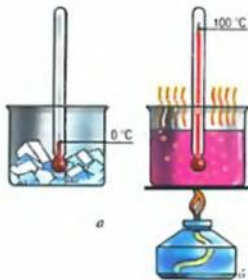
Для побудови шкали А. Цельсій обрав температури плавлення льоду і кипіння води, які мають сталі значення за нормального атмосферного тиску

За нормального атмосферного тиску (760 мм рт.ст., або 101 292,8 Па) помістимо термометр спочатку у посудину з льодом, який тоне (мал. 1.4, а). Після встановлення теплової рівноваги між термометром і льодом відмітимо відповідний рівень рідини в капілярі позначкою «0».

Після цього перенесемо термометр у посудину з водою, яка кипить (мал. 1.4, б), приписавши відповідному рівню рідини в капілярі значення «100». Якщо тепер поділити інтервал між цими двома позначками на 100 рівних частин, то одержимо термометр, проградуйований за температурною шкалою, яку запропонував А. Цельсій.

Одиницю температури за шкалою Цельсія називають **градусом Цельсія** (позначається °C). Нині Міжнародною системою одиниць (СІ) за основну одиницю температури визнано кельвін (позначається К), який за розміром дорівнює градусу Цельсія: $1\text{ К} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зазначимо, коли при вимірюваннях температури необхідно підкреслити, що вона визначається за шкалою Цельсія, слід користуватися позначенням °C; в усіх інших випадках, наприклад якщо зазначається різниця температур, слід користуватися кельвіном як міжнародно визнаною одиницею температури.



Мал. 1.4. Побудова температурної шкали Цельсія

Кельвін названо на честь відомого англійського вченого В. Томсона, лорда Кельвіна

За розміром 1 кельвін дорівнює 1 градусу Цельсія: $1\text{ К} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

- ?
1. Чому під час вимірювання температури власного тіла людина повинна тримати термометр кілька хвилин?
 2. Чому термометр має бути малим порівняно з тим тілом, температуру якого вимірюють?
 3. Запропонуйте власну конструкцію термометра і температурної шкали, побудованих на основі відомих вам фізичних явищ.
 4. Коли ми знімаємо покази термометра, то визначаємо температуру тіла чи температуру самого термометра?

ВПРАВА 2

1. Як відомо, при вимірюванні температури змінюється не лише об'єм термометричної рідини, а й скляної колбочки, в якій вона міститься. Чи впливає це на покази термометра і як? Яким має бути температурний коефіцієнт об'ємного розширення скла — набагато більшим, приблизно однаковим чи набагато меншим від коефіцієнта розширення рідини, щоб нейтралізувати цей вплив?
2. Чим пояснити, що в гарячій воді ртутний термометр показав 60°C , а спиртовий 62°C , хоча при 0°C і 75°C їхні покази були однаковими?
3. Запропонуйте свій спосіб градування медичного термометра.
- 4*. Кельвін запропонував шкалу температур, нуль якої відповідав -273°C . Виведіть формулу співвідношення температури за шкалою Цельсія і шкалою Кельвіна.

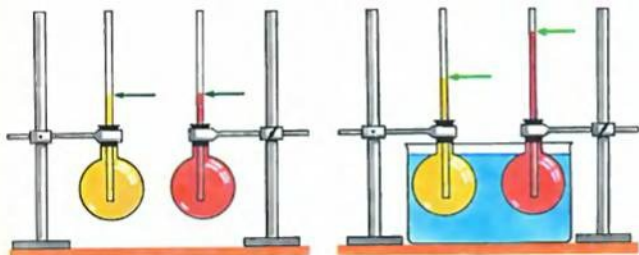
§ 3. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ТА ОБ'ЕМУ ТІЛ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

У житті ми не раз спостерігали, як температура впливає на перебіг окремих фізичних явищ. Наприклад, швидкість випаровування води тим більша, чим вища температура рідини (пригадайте: влітку калюжі висихають швидше); лід тане при 0°C , а вода кипить при 100°C за нормального атмосферного тиску тощо. З цих та інших прикладів ми бачимо, що деякі властивості тіл залежать від їх температури. На підтвердження цієї думки виконаємо досліди.

Візьмемо дві скляні колби зі щільно припасованими корками, в які вставлено скляні трубки (мал. 1.5). Колби заповнимо рідинами (наприклад водою та олією) так, щоб їх рівень був на кілька сантиметрів вищим від корків, і позначимо його. Обережно зануримо колби в посудину з гарячою водою і через деякий час позначимо нові рівні рідин. Слід мати на увазі, що спо-

Деякі властивості тіл залежать від температури

За нормальних умов лід тане при температурі 0°C , а вода кипить при 100°C



Мал. 1.5. Розширення рідин під час нагрівання

чатку рівень рідин у колбах зменшиться, оскільки спочатку нагріється і розшириться скло колб, а вже потім — рідини в колбах.

За отриманими результатами можна зробити висновок, що під час нагрівання об'єм рідин збільшується; при цьому різні рідини змінюють свій об'єм по-різному (об'єм змінюється залежно від роду рідини).

Визначимо тепер, як залежить зміна об'єму тіла від його температури. Дослід показав, що з підвищенням температури об'єм рідини збільшується. Якщо спочатку за температури t_0 рідина займала об'єм V_0 , то внаслідок нагрівання до температури t він збільшився до V , тобто об'єм рідини змінився на $\Delta V = V - V_0$.

Результати експерименту свідчать, що зміна об'єму рідини, віднесена до початкового її значення, прямо пропорційна зміні температури:

$$(V - V_0)/V_0 \sim (t - t_0), \text{ тобто } \Delta V/V_0 \sim \Delta t.$$

Якщо ввести коефіцієнт пропорційності b , то отримаємо

$$\Delta V/V_0 = b\Delta t, \text{ або } V = V_0(1 + b\Delta t).$$

Під час нагрівання об'єм води змінився більше, ніж об'єм олії

$$\frac{\Delta V}{V_0} = b\Delta t$$

$$V = V_0(1 + b\Delta t)$$

Для кожної речовини температурний коефіцієнт об'ємного розширення має своє конкретне значення (табл. 1).

Таблиця 1. Коефіцієнт об'ємного розширення β деяких рідин

Рідина	Коефіцієнт β , 1/K
Ацетон	0,0015
Нафта, бензин	0,0011
Вода	0,00021
Гас	0,00090
Гліцерин	0,00051
Етер	0,0016
Ртуть	0,00018
Спирт	0,0011

Коефіцієнт β показує, на яку частку зміниться об'єм рідини відносно його початкового об'єму V_0 внаслідок зміни температури тіла на 1 K. Наприклад, числове значення коефіцієнта об'ємного розширення води дорівнює 0,00021. Це означає, що під час нагрівання 1 л води на 1 K її об'єм збільшиться на 0,00021 л, тобто становитиме 1,00021 л; якщо температура зміниться на 10 K, то її об'єм становитиме вже 1,0021 л і т. ін.

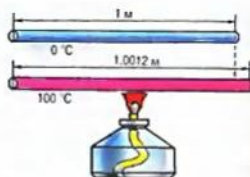
Легко переконатися, що властивість тіл змінювати свій об'єм під час нагрівання мають не лише рідини, а й тверді тіла і гази.

Візьмемо залізний стержень завдовжки l_0 (мал. 1.6) і нагріватимемо його у полум'ї спиртівки. З часом ми помітимо, що його довжина почне змінюватися: чим довше ми будемо його нагрівати, тим більше він буде видовжуватися.

Дослід підтверджує, що чим більше змінюється температура, тим більше змінюється довжина стержня. З міркувань, аналогічних до попередніх стосовно рідин, можна визначити цю залежність:

Коефіцієнт пропорційності β називають температурним коефіцієнтом об'ємного розширення

Температурний коефіцієнт β показує, на яку частку зміниться об'єм рідини відносно його початкового об'єму V_0 внаслідок зміни температури тіла на 1 K



Мал. 1.6. Нагрівання залізного стержня: залежність його довжини від температури

Зміна температури тіла веде до зміни його лінійних розмірів

$$(l - l_0)/l_0 = a(t - t_0), \text{ або } l = l_0(1 + a\Delta t).$$

Коефіцієнт пропорційності a називається температурним коефіцієнтом лінійного розширення тіла (табл. 2).

Таблиця 2. Коефіцієнт лінійного розширення тіл а деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт a , 1/К
Алюміній	0,00024
Дерево (за волокнами)	0,000005
Сталь	0,000012
Інвар (сплав Феруму з Ніколем)	0,0000015
Мідь	0,000017
Скло	0,0000095
Цегла	0,000005

Фізичний зміст коефіцієнта полягає в тому, що він показує, на яку частку зміниться довжина тіла відносно його початкової довжини l_0 внаслідок зміни температури на 1 К.

Наприклад, коефіцієнт лінійного розширення сталі становить 0,000012 1/К. Це означає, що нагрівання сталевого стержня завдовжки 1 м на 1 К спричинить його видовження на 0,00012 м.

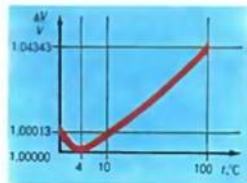
Слід зазначити, що нагрівання тіл не завжди однозначно веде до збільшення їхніх лінійних розмірів чи об'єму. Так, з нагріванням води від 0 °С до 4 °С її об'єм зменшується (мал. 1.7), відповідно, густина води збільшується, досягаючи максимуму при 4 °С. Очевидно, що в цьому інтервалі температур коефіцієнт об'ємного розширення води має від'ємне значення. З подальшим підвищенням температури води, від 4 °С і вище, її об'єм починає збільшуватися (а густина зменшуватися) і залежність об'єму від температури стає звичайною — з підвищенням температури об'єм зростає.

$$\frac{\Delta l}{l_0} = a\Delta t$$

$$l = l_0(1 + a\Delta t)$$

Якщо температура залізних рейок трамвайної колії завдовжки 10 м підвищиться на 10 К, то їхня довжина збільшиться на 0,0012 м, тобто на 1,2 мм

Головний мінерал на Землі — вода — має природні особливості теплового розширення



Мал. 1.7. Графік залежності відносного об'єму води від температури

- ?
1. У чому полягає фізичний зміст температурного коефіцієнта об'ємного розширення тіл? Наведіть його конкретний приклад з числовим значенням для ртуті.
 2. Яка з рідин, наведених у табл. 1, з нагріванням на 1 K змінює свій об'єм найбільше, а яка — найменше?
 3. Чому не можна заповнювати вщерть цистерни з паливом, якщо вони прямують з півночі на південь?
 4. Чому між рейками трамвайної чи залізничної колії роблять проміжки? Чому провід лінії електропередачі роблять з «провисанням»?
 5. Чи змінюється діаметр залізного стержня під час його нагрівання? Чому ми цього не помічаємо?
 6. Між двома стовпами натягнуто залізний, мідний та алюмінієвий дроти. Який із них провисне більше з підвищенням температури на 10 K ?
 7. З якого матеріалу ви запропонували б виготовити вимірювальну лінійку, якщо треба забезпечити найвищу точність вимірювання за значних коливань температури?

ВПРАВА 3

1. На скільки відсотків зміниться об'єм води при її охолодженні від 40 до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо її температурний коефіцієнт об'ємного розширення β у цьому інтервалі температур становить $0,00032\text{ 1/K}$?
2. На скільки відсотків зміниться об'єм льоду зі зміною температури від 0 до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо його температурний коефіцієнт об'ємного розширення β у цьому інтервалі температур становить $0,00015\text{ 1/K}$?
3. Танкер, об'єм сховищ якого становить $100\,000\text{ м}^3$, заповнено нафтою за температури $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розвантажили його за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Які «втрати» об'єму нафти мали місце в даному разі через зміну кліматичних умов?
4. Улітку за температури $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ залізний дріт між двома стовпами лінії електропередачі має довжину 50 м . Як зміниться його довжина взимку, коли температура повітря становитиме $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Досі тепловий стан тіл ми розглядали з позицій відшукування його кількісного вимірника — температури і не замислювалися над тим, яку властивість характеризує ця фізична величина, від чого вона залежить і що визначає?

Атомно-молекулярне вчення про будову речовини дає нам загальне уявлення про залежність інтенсивності руху мікрочастинок тіла від температури. Пригадаймо з курсу фізики для 7-го класу, що швидкість хаотичного руху атомів і молекул та температура тіла взаємозв'язані — чим вища температура тіла, тим більша швидкість руху його атомів, молекул та ін. частинок, і навпаки.

Отже, пов'язуючи швидкість руху молекул з температурою, ми можемо сказати, що хаотичний (безладний) рух мікрочастинок тіла є тепловим рухом.

Оскільки атоми і молекули тіла весь час перебувають у безупинному русі, то вони мають кінетичну енергію. Це поняття вперше ввів у 1851 р. видатний англійський учений В. Томсон (лорд Кельвін).

У XIX ст. цей висновок поклав в основу своєї гіпотези англійський учений Дж. Максвелл. Він показав, що температура тіла пов'язана не стільки зі швидкістю його молекул, скільки з їхньою середньою кінетичною енергією. На підставі теоретичних міркувань він довів, що температура тіла характеризує середню кінетичну енергію мікрочастинок, з яких воно складається. Це означає, що чим вища температура тіла, тим більша середня кінетична енергія мікрочастинок (атомів, молекул, електронів).

Разом з тим атоми і молекули не лише перебувають у хаотичному русі, а й весь час

Швидкість руху молекул залежить від температури тіла

Тепловий рух — це безладний рух мікрочастинок тіла (молекул, атомів, електронів), які утворюють тіло

Атоми і молекули мають неоднакові швидкості, оскільки в результаті зіткнень між собою одні з них рухаються швидше, інші повільніше

Якщо середня кінетична енергія атомів, молекул або йонів у одного тіла більша, ніж у іншого, то й температура його вища

взаємодіють між собою. У газах — це короточасні зіткнення. У рідинах і твердих тілах — це постійна взаємодія атомів, молекул або йонів, у результаті якої вони коливаються біля відносно стабільних своїх положень.

Тому внутрішню енергію тіла характеризує також потенціальна енергія взаємодії атомів, молекул або йонів.

Отже, з позицій атомно-молекулярного вчення про будову речовини можна стверджувати, що внутрішня енергія тіла складається з кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху атомів і молекул та потенціальної енергії їхньої взаємодії.

Співвідношенням цих складових внутрішньої енергії визначається, зокрема, агрегатний стан речовини. Наприклад, у газах молекули вільно рухаються в усьому об'ємі, який вони займають, і між зіткненнями практично не взаємодіють. Тому їхня середня кінетична енергія значно перевищує потенціальну енергію взаємодії.

У рідин кінетична енергія теплового руху атомів і молекул та потенціальна енергія їхньої взаємодії приблизно рівні, що пояснюється недостатньо сильною їх взаємодією та рухливістю.

У твердих тілах мікрочастинки взаємодіють між собою набагато сильніше. Потенціальна енергія взаємодії значно перевищує їхню кінетичну, оскільки мікрочастинки лише коливаються відносно своїх стабільних положень, практично не переміщуються в його об'ємі.

Таким чином, наявність внутрішньої енергії у кожного тіла зумовлена тепловим рухом і взаємодією мікрочастинок (атомів, молекул, йонів тощо), з яких воно складається. Залежно від агрегатного стану речовини внесок цих складових різний: внутрішня

Крім кінетичної енергії теплового руху мікрочастинок внутрішня енергія тіла повинна враховувати також енергію їхньої взаємодії

У газах

$$E_k \gg E_n$$

У рідинах

$$E_k \approx E_n$$

У твердих тілах

$$E_n \gg E_k$$

Наявність внутрішньої енергії у кожного тіла зумовлена тепловим рухом і взаємодією мікрочастинок (атомів, молекул, йонів тощо), з яких воно складається

енергія газів головним чином зумовлена кінетичною енергією теплового руху його частинок; у твердих тілах вона фактично визначається потенціальною енергією їхньої взаємодії; у рідин їхні частки приблизно рівні.

- ?
1. Що називають тепловим рухом? Як його інтенсивність пов'язана з температурою?
 2. Що таке внутрішня енергія тіла?
 3. Чи існують у природі такі тіла, в яких відсутня внутрішня енергія, і за яких умов це можливо?
 4. Як внутрішня енергія тіла пов'язана з температурою?
 5. Чому в газах внутрішня енергія в основному обумовлена тепловим рухом молекул, а в твердих тілах — їхньою взаємодією?
 6. Чи можна стверджувати, що в твердих тілах внутрішня енергія визначається лише потенціальною енергією взаємодії, а кінетична енергія теплового руху їхніх частинок практично відсутня?

§ 5. ДВА СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ТІЛ: ВИКОНАННЯ РОБОТИ І ТЕПЛОБМІН

Пригадаймо, що нам відомо про теплові явища, пов'язані насамперед зі зміною температури? Так, ми знаємо: щоб зігріти руки взимку, треба енергійно потерти долоні, і ми відчуємо тепло. Якщо молотком кілька разів ударити по металевій пластині, вона нагріється. Якщо доторкнутися до свердла зразу після того, як ним зробили отвір, то можна обпекти пальці. Коли ми накачуємо повітрям футбольний м'яч або камеру шини велосипеда, то насос при цьому нагрівається. Проведемо дослід.

Наллємо в колбу міксеру рідину, наприклад воду, і виміряємо її температуру (бажано це зробити найретельніше). Увімкнемо тепер міксер на кілька хвилин у елек-

промережу і після цього знову виміряємо температуру води. Отримані дані свідчать, що її температура зросла. За рахунок чого ж підвищилася температура води, адже ми її не нагрівали!

В усіх цих випадках виконувалася механічна робота, що, вочевидь, привело до нагрівання тіл.

Отже, зробимо висновок: **тепловий стан тіла може бути змінено внаслідок виконання механічної роботи.**

Легко пересвідчитися, що в результаті виконання роботи збільшилася середня кінетична енергія теплового руху частинок тіла, адже підвищилася температура. Якщо проаналізувати всі процеси, перебіг яких супроводжував зміну температури в наведених прикладах, то можна сказати, що в усіх цих випадках відбувався перехід механічної енергії у внутрішню. У таких випадках говорять: кінетична енергія відносного руху долонь рук перейшла у внутрішню енергію тіла людини; потенціальна енергія піднятого над поверхнею землі молотка — у внутрішню енергію пластини; кінетична енергія обертового руху свердла — у внутрішню енергію оброблюваної деталі і його самого тощо.

Очевидно, що мірою такого перетворення енергії була виконана механічна робота, значення якої дорівнює зміні **внутрішньої енергії тіл: $\Delta U = A$.**

Отже, ми зайвий раз переконалися в універсальності закону збереження енергії: енергія не зникає і не виникає з нічого, вона перетворюється з одного виду в інший.

Нам відомо також про інший спосіб зміни температури тіла — передавання теплоти від одних тіл іншим.

Цей спосіб зміни теплового стану тіла характеризує суто тепловий процес, який

Відомий англійський фізик Дж. Джоуль у середині XIX ст. експериментально встановив, що ніби «втрачена» механічна енергія веде до того самого наслідку, що й нагрівання тіл у полум'ї

Виконана механічна робота витрачається на збільшення внутрішньої енергії тіла

ΔU — зміна внутрішньої енергії тіла

Завдяки теплообміну нагрівають воду на вогнищі; у такий спосіб передається сонячна енергія на Землю; таким чином охолоджують продукти харчування в льоху або холодильнику тощо

називається теплообміном, або теплопередачею. Теплообмін відбувається через різницю температур між тілами: більш нагріті тіла віддають теплоту менш нагрітим, і ніколи самочинно не може статися навпаки. Тобто за звичайних умов неможливий теплообмін, під час якого теплота самочинно перейде від тіл, що мають нижчу температуру, до тіл, температура яких вища.

Як відомо, в результаті теплообміну відбувається вирівнювання температур тіл, які взаємодіють, і з часом вони досягають стану теплової рівноваги — їхні температури стають однаковими. Можна навести безліч прикладів, що це підтверджують. Так, вміщена в морозильну камеру холодильника вода поступово охолоджуватиметься, віддаючи частину своєї теплової енергії камері; через певний час вода перетвориться в лід. Якщо тепер його витягти з холодильника і залишити в кімнаті, то внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем він розтане; тала вода, поглинаючи теплоту навколишнього повітря, через певний час матиме кімнатну температуру, але температура у кімнаті децю знизиться.

Ніколи не станеться навпаки: температура води в холодильнику не підвищуватиметься, якщо вона вища за температуру морозильної камери; лід не віддаватиме своєї теплоти середовищу, температура якого вища, завдяки пониженню своєї температури. Це закон природи.

Кількісно теплообмін характеризується фізичною величиною, яка називається кількістю теплоти (позначається Q). Якщо відбуваються лише теплообмінні процеси, то змінюється їхня температура або агрегатний стан (плавлення твердих тіл, випаровування рідин тощо). Тобто кількість теплоти, передана тілу в процесі теплообміну, змінює його внутрішню енергію: $Q = \Delta U$.



За звичайних умов неможливо здійснити процес, за якого теплота самочинно перейшла б від тіл, що мають нижчу температуру, до тіл, температура яких вища

Теплообмінні процеси характеризує кількість теплоти



Мал. 1.8. Два способи зміни внутрішньої енергії тіла

Природно, що кількість теплоти, як і робота та енергія, вимірюється в джоулях (Дж).

Таким чином, внутрішню енергію можна змінити виконанням механічної роботи або теплопередачею.

Отже, у природі існує два способи зміни внутрішньої енергії тіла, які принципово відрізняються один від одного (мал. 1.8): перший пов'язаний із виконанням механічної роботи, другий — з теплообміном.

- ?
1. Якими способами можна змінити тепловий стан тіл? Наведіть приклади кожного з них.
 2. Наведіть власний приклад зміни внутрішньої енергії в результаті виконання роботи і поясніть перетворення енергії, що при цьому відбуваються.
 3. Поясніть теплообмінні процеси, що відбуваються під час танення льоду і нагрівання води?
 4. Чи може нагрітий на сонці камінець, кинутий у воду, понизити її температуру?
 5. Сформулюйте загальний висновок щодо зміни внутрішньої енергії тіла під час теплових процесів. Чому дорівнює ця зміна:
а) якщо відсутній теплообмін? б) якщо відбувається лише передача теплоти?

ВПРАВА 4

1. Якщо закорковану пробірку з водою нагрівати у полум'ї газового пальника, через деякий час корок «вистрілить». Поясніть зміну внутрішньої енергії води, що відбувається при цьому.
2. Молоток нагріватиметься, коли ним забиватимуть цях і коли він лежатиме на сонці. Назвіть способи змін внутрішньої енергії молотка в обох випадках.

У природі передавання теплоти від одних тіл іншим може відбуватися по-різному. Залежно від цього розрізняють три види теплообміну: теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання або променистий теплообмін.

Теплопровідність. Ми не раз спостерігали, як передається теплота від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих. Проведемо дослід.

Візьмемо залізний цвях та скляну паличку і будемо нагрівати один з їхніх кінців у полум'ї газового пальника (мал. 1.9). Через певний час ми пальцями відчуємо тепло, а згодом уже не зможемо тримати в руках залізний цвях, оскільки його температура значно підвищиться. Скляну ж паличку ми триматимемо ще довго, поки її температура не підвищиться до такого самого значення.

Розглянемо механізм передавання теплоти в даному випадку з погляду атомно-молекулярного вчення. Молекули повітря в полум'ї пальника мають значно більшу кінетичну енергію, ніж молекули скляної палички і залізного цвяха. Унаслідок зіткнення вони передають частину своєї енергії мікрочастинкам цвяха і палички, завдяки чому температура тіл зростає. Згодом мікрочастинки розжарених кінців палички і цвяха передають частину своєї енергії сусіднім частинкам, збільшуючи їхню кінетичну енергію. Таке передавання енергії у результаті безпосередньої взаємодії частинок тіл здійснюється ніби ланцюжком, шар за шаром, і з часом досягається вирівнювання температури всіх частин тіла. Зрозуміло, що ніякого перенесення речовини при цьому не відбувається.



Мал. 1.9. Теплопровідність: нагрівання скляної палички і залізного цвяха в полум'ї спиртівки

Збільшення кінетичної енергії молекул тіла спричиняє зростання його температури

Передавання теплоти від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, яке веде до вирівнювання температур без перенесення речовини, називається *теплопровідністю*.

Встановлено, що найбільшу теплопровідність мають метали, серед яких найкращими теплопровідниками є мідь і срібло. Значно гірше проводять тепло дерево, цегла, тканини, більшість пластмас, папір тощо.

Найгіршими провідниками тепла вважаються гази. Цим, зокрема, пояснюється збереження тепла людського тіла завдяки хутряним виробам. Адже між тонкими волосинками хутра знаходиться поганий провідник тепла — повітря, яке через погану теплопровідність захищає людину від холоду.

Конвекція. У рідинах і газах під час передавання теплоти відбуваються теплообмінні процеси, що супроводжуються перенесенням речовини. Теплообмін унаслідок перенесення речовини у газах і рідинах називається *конвекцією*.

Наллємо в колбу води і почнемо нагрівати її на пальнику (мал. 1.10). Щоб краще побачити переміщення потоків рідини, кинемо в колбу дві-три зернини перманганату калію (у побуті — «марганцівки»). Ми помітимо, що рідина весь час перемішується у безладних вихрових потоках: нижні шари води піднімаються вгору, а верхні опускаються вниз. Це пояснюється різницею густин теплих і холодних шарів рідини, внаслідок чого виникає архімедова сила. Завдяки їй легші теплі шари води піднімаються вгору, а важчі холодні — опускаються вниз. Такий теплообмін з перенесенням речовини відбувається доти, доки існує різниця температур.

Конвекційний теплообмін зумовлює багато природних явищ і процесів. Завдяки конвекції повітря в кімнаті здійснюється її

У різних речовин теплопровідність неоднакова

Існують речовини, які погано проводять тепло. Це азбест, вазелін, полістирол, руберойд, вата тощо. Їх використовують для теплоізоляції, зокрема в будівництві для утеплення приміщень



Мал. 1.10. Конвекція в рідинах: кристалики перманганату калію дають змогу побачити вихрові потоки води

$$F_A = \rho g V$$

Густина води залежить від температури: чим вища температура, тим менша густина (починаючи з 4 °C)

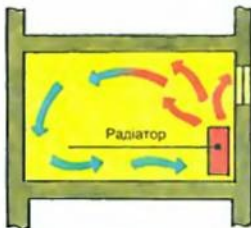
обігрів від системи опалення (мал.1.11): потоки теплого повітря від радіатора піднімаються вгору, а їх заміщує більш важке холодне повітря; воно, у свою чергу, нагрівається від радіатора, стає теплішим і піднімається вгору. Таке постійне переміщення холодного і теплого повітря вирівнює його температуру в різних куточках кімнати.

Променевий теплообмін. Попередні два види передавання тепла передбачали наявність певного середовища і носіїв взаємодії, завдяки яким відбувався теплообмін. У разі теплопровідності — це мікрочастинки (атоми і молекули), з яких складається речовина. Конвекційний теплообмін пояснюється переміщенням холодних і теплих потоків рідин чи газів, які спричинені нерівностями густини середовища.

Існує, проте, й такий вид теплообміну, який не потребує наявності середовища. Цей особливий вид теплообміну називається променевим, або **тепловим, випромінюванням**. Воно подібне до світлового випромінювання і за своєю природою нічим від нього не відрізняється, хоча має свої специфічні закономірності. За променевого теплообміну передавання теплоти зумовлене перетворенням частини внутрішньої енергії тіла в енергію випромінювання.

Теплову енергію випромінюють усі без винятку тіла, оскільки всі вони мають **внутрішню енергію**. Випромінювання і поглинання теплової енергії залежить від стану і кольору поверхні тіла: шорсткі чорні поверхні поглинають і випромінюють теплоту краще, ніж гладенькі і блискучі.

Енергія, яку випромінює тіло, залежить від його температури: чим вища температура тіла, тим більше енергії воно випромінює. Справді, якщо долоні рук по черзі підносити до холодного і розігрітого предметів (наприклад, чайника), то ми відчу-



Мал. 1.11. Конвекційний обігрів кімнати завдяки системі опалення будинку

Завдяки тепловому випромінюванню тепло передається в безповітряному просторі, у космосі, сонячна енергія потрапляє на Землю і підтримує життя на ній

Температура поверхні Сонця дорівнює приблизно 6000... 7000°C. Тому частка енергії сонячного випромінювання, що досягає Землі, досить вагомá: за 1 с на поверхню Землі потрапляє приблизно 10^{17} Дж сонячної енергії

«мо тепло лише від гарячого чайника. Проте це не означає, що холодний чайник не випромінює теплової енергії: просто його випромінювання менш інтенсивне, ніж гарячого чайника.

Лід також випромінює тепло (мал. 1.12). Проте нам здається, що від нього «дме холодом». Це відчуття з'являється у нас тому, що створюється зворотний потік тепла — від руки до льоду, і вона отримує меншу кількість теплоти, ніж сама випромінює в навколишнє середовище.

Таким чином, за механізмом передавання теплоти розрізняють три види теплообміну:

теплопровідність, яка властива тілам у будь-якому агрегатному стані і обумовлена взаємодією мікрочастинок речовини;

конвекція, що супроводжується перенесенням речовини і притаманна рідинам і газам;

теплове випромінювання, або **променевий теплообмін**, який здійснюється всіма без винятку тілами за рахунок випромінювання частини своєї внутрішньої енергії і перетворення поглинутої енергії випромінювання у внутрішню.



Мал. 1.12. Випромінювання тепла льодом

Щоб у термосі зменшити втрати теплової енергії на променевий теплообмін, поверхню його колби роблять дзеркальною; для зменшення в ньому конвекційного теплообміну між подвійними її стінками створюють вакуум (відкачують повітря); теплопровідність у термосі вагома лише біля його горловини, яку роблять, як правило, вузькою

- ?
1. Які види теплообміну існують у природі?
 2. Поясніть механізм передавання теплоти при теплопровідності.
 3. Чи правильний з фізичної точки зору вислів, що шуба гріє?
 4. Чим відрізняється механізм теплопровідності від конвекції? Чи може у твердих тілах відбуватися конвекційний теплообмін?
 5. Поясніть утворення вітру на березі моря.
 6. Що характерно для теплового випромінювання? Чим воно відрізняється від теплопровідності і конвекції?
 7. Як залежить енергія теплового випромінювання від температури тіла?
 8. Чому чорна поверхня нагрівається на сонці більше, ніж срібляста?

ВПРАВА 5

1. У спеку жителі пустель одягають теплий (ватяний чи хутряний) одяг. Чим це можна пояснити?
2. Каскадери, що виконують трюки з вогнем, змазують своє тіло вазеліном. З якою метою вони це роблять?
3. Чому в сильний мороз металеві предмети здаються нам на дотик холоднішими, ніж дерев'яні?
4. Чому цегляний гараж вважається «теплішим», ніж металевий?
5. Чому зовнішні поверхні рефрижераторів (залізничних або автомобільних холодильних камер) найчастіше роблять сріблястими?
6. Чому сковороду роблять з металу, а ручку до неї — з дерева чи пластмаси?

§ 7. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ

Надання тілу чи відбирання від нього певної кількості теплоти призводить до зміни його внутрішньої енергії. Результатом цієї зміни може стати:

- а) підвищення або зниження температури тіла залежно від того, надана тілу теплота чи відібрана у нього;
- б) зміна агрегатного стану речовини;
- в) часткове виконання роботи, наприклад розширення газу.

Передавання тілу певної кількості теплоти під час теплообміну без виконання роботи веде до зміни його внутрішньої енергії. Вочевидь, що зміна внутрішньої енергії пропорційна зміні температури: $\Delta U \sim \Delta t$. Урахувавши, що за цих умов $\Delta U = Q$, можна стверджувати, що надана тілу кількість теплоти впливає на зміну його температури: $Q \sim \Delta t$.

Справді, чим довше ми гріємо воду (отже, чим більшу кількість теплоти надаємо їй), тим вищою стає її температура.

Надання тілу теплоти може привести до плавлення твердих тіл або випаровування рідин. Зворотні процеси — кристалізація, конденсація, тверднення відбуваються з виділенням теплоти

Кількість теплоти, надана тілу, пропорційна зміні температури, якщо при цьому не виконується робота і не відбувається зміна агрегатного стану речовини

$$Q \sim \Delta t$$

З курсу математики відомо, щоб записати рівність, треба встановити коефіцієнт пропорційності:

$$Q = C\Delta t.$$

Коефіцієнт пропорційності C називається теплоємністю тіла. Він показує, яку кількість теплоти треба надати даному тілу, щоб підвищити його температуру на 1 К.

Теплоємність вимірюється в джоулях на кельвін ($\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$).

Приклад 1. Визначити кількість теплоти, яку треба надати тілу теплоємністю $500 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, щоб підвищити його температуру на 20 К.

Дано:

Розв'язання:

$$C = 500 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$Q = C\Delta t,$$

$$\Delta t = 20 \text{ К}$$

$$Q = 500 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 20 \text{ К} = 10000 \text{ Дж}.$$

$$Q = ?$$

Відповідь. Щоб нагріти дане тіло на 20 К, необхідно витратити 10000 Дж теплоти.

Дослідним шляхом можна переконатися, що теплоємність тіла залежить від його маси і роду речовини, з якої воно виготовлене.

Якщо, наприклад, воді, що знаходиться у відрі за кімнатної температури, надати теплоту, що дорівнює 1 кДж (наприклад влити 3 г окропу), температура води у відрі при цьому незначно зміниться. Якщо ж таку саму кількість теплоти надати воді у склянці ($m = 200 \text{ г}$), то її температура підвищиться приблизно на 1 К (мал. 1.13).

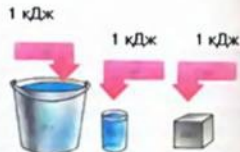
Якщо 1 кДж теплоти надати залізного важку такої самої маси ($m = 200 \text{ г}$), то його

Коефіцієнт пропорційності C називається теплоємністю тіла

$$C = \frac{Q}{\Delta t}$$

Теплоємність тіл вимірюється у $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

Теплоємність тіла $500 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ означає, що для підвищення температури тіла на 1 К треба надати йому 500 Дж теплоти



Мал. 1.13. Надання 1 кДж теплоти відру води, склянці води і залізному важку

температура підвищиться вже на 10 К, а якщо свинцевому, то температура підвищиться на 36 К; при наданні ж такої самої кількості теплоти 200 г олії температура підвищиться всього на 3 К.

Отже, кількість теплоти, надана тілу внаслідок нагрівання, залежить від його маси, роду речовини та різниці температур у кінцевому і початковому станах:

$$Q = cm(t - t_0) = cm\Delta t.$$

Коефіцієнт пропорційності c називається питомою теплоємністю речовини. Вона дорівнює відношенню теплоємності тіла до його маси, тобто визначає теплоємність 1 кг речовини: $c = \frac{C}{m}$. Так, найважливіший мінімум на Землі — вода має найбільшу питому теплоємність: $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

За основну одиницю кількості теплоти взято джоуль (Дж). Для теплових процесів джоуль досить мала одиниця. Варто сказати, що, наприклад, під час нагрівання 1 г води на 1 К треба витратити 4,19 Дж теплоти. Тому для зручності використовують кратні одиниці кількості теплоти — кілоджоуль (кДж) і мегаджоуль (МДж):

$$1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж} = 10^3 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ МДж} = 1\,000\,000 \text{ Дж} = 10^6 \text{ Дж}.$$

Раніше для вимірювання кількості теплоти використовували одиницю, яка називається «калорія» (від лат. *calor* — тепло). 1 калорія дорівнює кількості теплоти, необхідної для нагрівання 1 г води на 1 К. Між джоулем і калорією існує співвідношення: $1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$.

Приклад 2. Визначити кількість теплоти, що треба витратити для нагрівання 1 кг во-

дим більша маса тіла, тим більшу кількість теплоти треба йому надати, щоб змінити його температуру на 1 К

$$Q = cm\Delta t$$

$$c = \frac{C}{m}$$

$$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$$

ди від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кипіння за нормального атмосферного тиску.

Дано:

$$m = 1\text{ кг}$$

$$t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q = ?$$

Розв'язання:

$$Q = cm\Delta t, \Delta t = t_2 - t_1 = 100\text{ К},$$

$$Q = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1\text{ кг} \cdot 100\text{ К} =$$

$$= 420000\text{ Дж} = 420\text{ кДж}.$$

Відповідь. Щоб нагріти 1 кг води від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кипіння, треба витратити 420 кДж теплоти.

- ?
1. Які наслідки можуть бути, коли в результаті теплообміну тілу надано певну кількість теплоти?
 2. Від чого залежить кількість теплоти при нагріванні чи охолодженні тіла?
 3. Який фізичний зміст теплоємності тіла?
 4. В яких одиницях вимірюється кількість теплоти?
 5. Яке співвідношення існує між джоулем, кілоджоулем і мегаджоулем? Скільки кілоджоулів в 1 МДж ?

§ 8. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ РЕЧОВИНИ

Нами було з'ясовано, що для зміни температури різних тіл на 1 К потрібна різна кількість теплоти, тобто вона залежить від роду речовини. Підтвердимо це на досліді.

Візьмемо дві колби і наллємо в них води й олії однакові маси. Помістимо їх у кювету з водою, що нагрівається від пальника. Будемо спостерігати за зміною температури води та олії під час їхнього нагрівання за однакових умов (мал. 1.14). Ми помітимо, що температура олії зростатиме значно швидше, ніж води. Це означає, що для нагрівання одиниці маси олії на 1 К потрібна менша кількість теплоти, ніж для води.

Фізична величина, що визначається кількістю теплоти, яку треба надати 1 кг ре-

човини для підвищення температури тіла на 1 К, називається *питомою теплоємністю речовини*

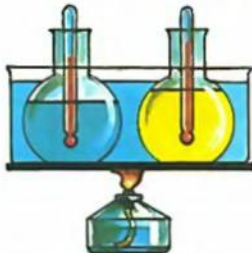
$$c = \frac{Q}{m\Delta t}$$

Встановлено, що різні речовини мають різну питому теплоємність. У табл. 3 наведено значення питомої теплоємності деяких речовин (при 20 °С).

Таблиця 3. Питомі теплоємності деяких речовин

Тверде тіло	Питомі теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Рідина	Питомі теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Алюміній	900	Бензин	1400
Залізо, сталь	450	Вода	4200
Лід	2100	Гас	2100
Мідь	380	Глицерин	2400
Полініл-хлорид	920	Олія	1800
Скло лабораторне	840	Ртуть	140
Сухе дерево (дуб)	2400	Спирт	2500
Цегла	850	Фреон-12	840

Фізична суть питомої теплоємності речовини полягає в тому, що вона визначає, як впливає теплопередача на тепловий стан тіла, зокрема на його внутрішню енергію. Числове значення питомої теплоємності речовини визначає зміну внутрішньої енергії тіла масою 1 кг зі зміною температури на 1 К. Наприклад, значення питомої теплоємності алюмінію $900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ означає, що підвищення температури 1 кг алюмінію на 1 К викличе зростання його внутрішньої енергії на 900 Дж, і навпаки, вона зменшиться на 900 Дж, якщо температура 1 кг алюмінію знизиться на 1 К.



Мал. 1.14. Нагрівання води й олії для демонстрації їх різної питомої теплоємності*

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}$$

Різні речовини мають різну питому теплоємність

Числове значення питомої теплоємності речовини вказує на ту кількість теплоти, яку треба надати тілу масою 1 кг, або відняти від нього, щоб змінити його температуру на 1 К

* Об'єм олії повинен бути більшим, ніж об'єм води.

Приклад 1. Як зміниться внутрішня енергія 200 г молока, температура якого 20 °С, після того як його помістили в холодильник, де температура 5 °С? Питома теплоємність молока $3950 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Дано:

Розв'язання:

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 5^\circ\text{C}$$

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

$$c = 3950 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta U = ?$$

$$\Delta U = Q; M = 15 \text{ К}$$

$$Q = c m \Delta t,$$

$$Q = 3950 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 15 \text{ К} =$$

$$= 11850 \text{ Дж}.$$

$$Q = c m \Delta t$$

Відповідь. Внутрішня енергія молока зменшиться майже на 12 кДж.

Приклад 2. На скільки зміниться температура залізного предмета масою 100 г, якщо йому надати 22,5 кДж теплоти?

Дано:

Розв'язання:

$$m = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг}$$

$$Q = 22,5 \text{ кДж}$$

$$c = 450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta t = ?$$

$$Q = c m \Delta t, \text{ звідси } \Delta t = \frac{Q}{c m};$$

$$\Delta t = \frac{22500 \text{ Дж}}{450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}} = 500 \text{ К}.$$

$$450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Відповідь. Температура предмета зростає на 500 К.

ВПРАВА 6

1. Яка теплоємність алюмінієвого калориметра масою 150 г?
2. Під час охолодження газу на 30 °С виділилося 25,2 кДж теплоти. Яка маса газу?
3. На нагрівання металеві деталі масою 10 кг від 20 до 120 °С потрібна така сама кількість теплоти, яка виділяється під час охолодження 1 л води на 90 °С. З якого металу виготовлена деталь?
4. Сталевому бруску об'ємом 300 см³ передано 117 кДж теплоти. На скільки змінилася температура бруска?
5. У залізну каструлю масою 1,5 кг налили 2,5 л води за температури 20 °С. Скільки теплоти треба надати каструлі з водою, щоб вода закипіла за нормального атмосферного тиску?

Визначення питомої теплоємності речовини

Мета: визначити питому теплоємність речовини калориметричним методом.

Обладнання: склянка з водою, калориметр, термометр, терези з важками, досліджуване тіло, посудина з гарячою водою.



Теоретичні відомості

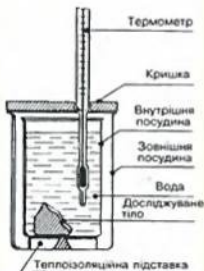
Для вимірювання наслідків різних теплових процесів у фізичних, хімічних, біологічних дослідженнях застосовують прилади, які називаються калориметрами (від лат. *calor* — тепло і грец. *metreo* — вимірюю). Для вимірювання загальної кількості теплоти, що виділяється під час перебігу теплового процесу від його початку до кінця, найчастіше використовують калориметр, що складається з тонкостінного циліндра з водою, теплоізо-

ляційної підставки, кришки і термометра (мал. 1.15).

Якщо теплообмін між досліджуваним тілом і калориметром відбувається швидко і втратами теплоти можна знехтувати, то в основу калориметричного методу покладається рівність кількості теплоти Q_T , яку досліджуване тіло віддає, і кількості теплоти Q_K , яку одержує калориметр (вода і сам циліндр): $Q_T = Q_K$.

Основною характеристикою калориметра є його теплоємність C , яку визначають заздалегідь. Знаючи масу води m_1 і масу циліндра m_2 та матеріал, з якого він зроблений, можна обчислити теплоємність калориметра: $C = c_1 m_1 + c_2 m_2$. Якщо питома теплоємність циліндра c_2 і його маса m_2 будуть набагато меншими за питому теплоємність ($c_1 = 4200$ Дж/кг·К), і масу води, то другим доданком можна знехтувати. У такому разі вимірювання кількості теплоти, що виділяється під час теплового процесу, зводиться до вимірювання зміни температури і обчислення кількості теплоти, яку отримала вода в калориметрі:

$$Q_K = C \Delta t = c_1 m_1 \Delta t.$$



Мал. 1.15. Будова калориметра

Виконання роботи

1. Налийте в калориметр приблизно 150 г холодної води і виміряйте її масу.

2. Виміряйте за допомогою важільних терезів масу тіла, питому теплоємність якого ви будете визначати.

3. Нагрійте досліджуване тіло в гарячій воді і виміряйте її температуру (це й буде початкова температура тіла).

4. Занурте досліджуване тіло в калориметр, попередньо вимірявши температуру води в ньому. Після встановлення теплової рівноваги знову виміряйте температуру води в калориметрі (це й буде кінцева температура тіла).

5. Дані досліду занесіть до таблиці.

Маса води в калориметрі m_1 , кг	Початкова температура води або тіла t_1 , °C	Маса досліджуваного тіла m_2 , кг	Температура води і тіла в стані теплової рівноваги t_2 , °C

6. Обчисліть кількість теплоти Q_1 , яку отримала вода в калориметрі: $Q_1 = c_1 m_1 (t_2 - t_1)$.

7. Обчисліть питому теплоємність досліджуваного тіла c_2 , врахувавши, що $Q_2 = Q_1$:

$$c_2 = Q_2 / (m_2 \Delta t).$$

8. За одержаним значенням визначте речовину досліджуваного тіла за таблицею.

- ?
1. Дайте визначення питомої теплоємності речовини.
 2. Який фізичний зміст має дана фізична величина?
 3. Питома теплоємність льоду 2100 Дж/(кг · К). Що це означає?
 4. Скільки теплоти треба надати 1 кг алюмінію, щоб нагріти його на 1К?
 5. 1 кг алюмінію та 1 кг заліза надано однакову кількість теплоти. Яке з тіл нагріється більше?
 6. Яка основна ідея покладена в основу калориметричного методу вимірювання питомої теплоємності речовини?
 7. Чому внутрішню посудину калориметра зроблено з алюмінію?
 8. На підставі чого ми можемо стверджувати, що кількість теплоти, яку віддало досліджуване тіло, дорівнює кількості теплоти, яку отримав калориметр?

Досить часто виникає потреба у знаходженні значень фізичних величин, що характеризують теплообмінні процеси під час встановлення теплової рівноваги. Наприклад, визначити температуру суміші під час змішування гарячої і холодної води або з'ясувати кількість поглинутої тілом теплоти внаслідок теплопередачі. Інколи треба розрахувати кількість теплоти, яку необхідно надати тілу, щоб воно мало певну температуру.

В усіх цих випадках треба складати і розв'язувати рівняння, що містять невідомі величини, відшукування яких і є його розв'язком. У розрахунках теплообмінних процесів, коли не виконується механічна робота, застосовують певні правила, що дають змогу вірогідно встановити умови перебігу теплових явищ і, отже, знайти шукану величину. Сформулюємо їх.

По-перше, усі тіла, що перебувають у теплообміні, з часом досягають стану теплової рівноваги, коли їх температури вирівнюються. Це означає, якщо температура тіла A дорівнює температурі тіла B , а температура тіла B , у свою чергу, дорівнює температурі тіла C , то однакові також температури тіл A і C .

По-друге, слід враховувати, що за законом збереження енергії, який має загальний характер для всіх природних явищ, теплота не може безслідно зникнути або виникнути з нічого. Тобто, **перебуваючи в теплообмінному процесі, одні тіла віддають таку кількість теплоти, яку отримують інші**. Ця умова називається **тепловим балансом**.

По-третє, у фізиці прийнято вважати кількість теплоти додатною, якщо тіло поглинає теплову енергію, і від'ємною, якщо

Для розрахунку теплообмінних процесів потрібно скласти рівняння відносно кількості теплоти, яку втрачають або набувають усі тіла, що обмінюються енергією

$$\text{Якщо } t_A = t_B \text{ і } t_B = t_C, \text{ то } t_A = t_C$$

Рівняння теплового балансу відтворює загальний закон збереження енергії

Кількість теплоти додатна, якщо тіло поглинає теплову енергію, і від'ємна, якщо воно її віддає

воно віддає її. Тому рівняння теплового балансу складають з урахуванням того, що сума кількості теплоти, яку отримали тіла, дорівнює сумі кількості теплоти, яку віддали інші тіла внаслідок теплообміну:

$$Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots$$

Зазначені правила визначають певну послідовність дій, якої доцільно дотримуватися під час розрахунків теплообмінних процесів:

- з'ясувати, які тіла беруть участь у теплообміні;
- якої температури досягають тіла в стані теплової рівноваги? Якщо за умовою задачі вона не задана, позначити її літерою t ;
- встановити, які з тіл віддають теплоту, а які її отримують; записати формулу кількості теплоти для кожного з тіл, що перебуває в теплообмінному процесі (при цьому слід завжди від більшої температури віднімати меншу);
- скласти рівняння теплового балансу, в лівій частині якого записати суму кількості теплоти, що її отримували тіла, перебуваючи в теплообміні; у правій частині — суму кількості теплоти, що її віддали тіла в результаті цього;
- розв'язати рівняння відносно шуканої величини.

Послідовність кроків під час розв'язування фізичних задач:

1-й крок

2-й крок

3-й крок

4-й крок

5-й крок

Приклад 1. Якою стане температура води, якщо змішати 100 г окропу і 100 г води, температура якої 20 °C?

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг} \\ m_2 &= 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг} \\ t_1 &= 100 \text{ °C} \\ t_2 &= 20 \text{ °C} \\ c &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$t = ?$

Розв'язання:

За умовою теплового балансу кількість теплоти Q_1 , яку віддасть окріп, остигаючи до температури t , буде дорівнювати кількості теплоти Q_2 , яку отримає холодна вода, нагріваючись до цієї самої температури t . $Q_1 = Q_2$.

$$Q_1 = cm_1(t_1 - t); \quad Q_2 = cm_2(t - t_2);$$

$$cm_1(t_1 - t) = cm_2(t - t_2).$$

Оскільки $m_1 = m_2$, то $100 \text{ °C} - t = (t - 20 \text{ °C}); \quad 2t = 120 \text{ °C}; \quad t = 60 \text{ °C}.$

Відповідь. Температура води стане 60 °C.

Приклад 2. В алюмінієвій каструлі масою 1,5 кг є 800 г води кімнатної температури (20 °С). Скільки окропу треба долити в каструлю, щоб одержати воду з температурою 45 °С.

Дано:

$$\begin{aligned} t_1 &= 100\text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_1 &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ m_2 &= 800\text{ г} = 0,8\text{ кг} \\ t_2 &= t_3 = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ m_3 &= 1,5\text{ кг} \\ t &= 45\text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_2 &= 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ m_1 &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

У теплообміні задіяні каструля, холодна і гаряча вода. За умовою теплового балансу кількість теплоти Q_1 , яку віддасть окріп, остигаючи до температури 45 °С, буде дорівнювати кількості теплоти, яку отримують холодна вода (Q_2) і каструля (Q_3), нагріваючись до цієї самої температури:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3;$$

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_1 - t); \quad Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2); \quad Q_3 = c_3 m_3 (t - t_3);$$

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2) + c_3 m_3 (t - t_3);$$

$$4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot m_1 \cdot (100\text{ }^{\circ}\text{C} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}) = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,8\text{ кг} \cdot (45\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) + 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1,5\text{ кг} \cdot (45\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}).$$

$$\text{Звідси, } 231000 m_1 = 117750\text{ кг}; \quad m_1 = 0,5\text{ кг}.$$

Відповідь. Потрібно долити 0,5 кг окропу.

Приклад 3. В алюмінієвий калориметр, маса якого 100 г, налито 100 г води кімнатної температури. У калориметр кладуть тіло масою 150 г, температура якого 80 °С. Через деякий час після встановлення теплової рівноваги температура в калориметрі стала 27 °С. Визначити питому теплоємність тіла.

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 100\text{ г} = 0,1\text{ кг} \\ c_1 &= 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_1 &= t_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ m_2 &= 100\text{ г} = 0,1\text{ кг} \\ c_2 &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_3 &= 80\text{ }^{\circ}\text{C} \\ m_3 &= 150\text{ г} = 0,15\text{ кг} \\ t &= 27\text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_3 &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Унаслідок теплообміну між калориметром, водою і досліджуваным тілом температура в калориметрі підвищилася від 20 до 27 °С. Отже, кількість теплоти Q_3 , яку віддало тіло, дорівнює сумі кількості теплоти, яку отримують вода в калориметрі Q_2 і сам калориметр Q_1 :

$$Q_3 = Q_1 + Q_2;$$

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1); \quad Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2); \quad Q_3 = c_3 m_3 (t_3 - t);$$

$$c_3 m_3 (t_3 - t) = c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2);$$

$$c_3 \cdot 7,95\text{ кг} \cdot \text{К} = 3570\text{ Дж};$$

$$c_3 = 450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Відповідь. Питома теплоємність досліджуваного тіла дорівнює $450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, тобто це — залізо.

Порівняння кількості теплоти при змішуванні води різної температури

Мета: дослідним шляхом переконатися, чи справджується рівняння теплового балансу під час змішування води різної температури.

Обладнання: калориметр, термометр, мірний циліндр чи мензурка, склянка, посудини з водою.



Теоретичні відомості

Як відомо, рівняння теплового балансу передбачає врахування у теплообмінному процесі всіх тіл, що взаємодіють. Проте на практиці це вдається зробити не завжди, оскільки можливі втрати теплоти в навколишнє середовище або інші процеси, тепловий ефект яких важко врахувати. Через це, досліджуючи теплообмінні процеси, зокрема під час змішування води різної температури, важливо якомога зменшити такі втрати теплоти. Тоді й результат буде надійнішим, і дослід більш досконалим.

Для цього найчастіше використовують калориметр, у якого по-

двійні стінки, і тому теплопровідність мала порівняно з іншими тілами. Це зменшує обмін теплотою між калориметром і навколишнім середовищем, що дозволяє спростити рівняння, оскільки можна знехтувати одним із доданків. Крім того, виконувати дослід слід чітко, не гаючи часу на підготовчу роботу. Головне — це зафіксувати стан теплової рівноваги, про що свідчать сталі покази термометра.

Оскільки в шкільних умовах важко забезпечити високу точність вимірювань калориметричним методом, обчислення краще робити з двома значущими цифрами.

Виконання роботи

1. За допомогою мірного циліндра чи мензурки відміряйте в склянку приблизно 100 мл холодної води і виміряйте її температуру (бажано мати воду кімнатної температури).

2. Налийте в калориметр приблизно стільки ж гарячої води і виміряйте її температуру.

3. Обережно влийте зі склянки в калориметр холодну воду і після

встановлення теплової рівноваги виміряйте температуру суміші.

4. Результати вимірювань занесіть до таблиці.

Маса холодної води m_1 , г	Початкова температура холодної води t_1 , °C	Маса гарячої води m_2 , г	Початкова температура гарячої води t_2 , °C	Температура суміші t , °C

5. Обчисліть кількість теплоти Q_1 , яку отримала холодна вода:

$$Q_1 = cm_1(t - t_1).$$

6. Обчисліть кількість теплоти Q_2 , яку віддала гаряча вода:

$$Q_2 = cm_2(t_2 - t).$$

7. Порівняйте їх і зробіть висновок.

- ?
1. Доведіть математично, що кількість теплоти буде від'ємною, якщо тіло віддає теплоту навколишньому середовищу.
 2. З чого випливає умова теплового балансу?
 3. Чи може хоч одне тіло, що перебуває в стані теплової рівноваги з іншими тілами, мати відмінну від них температуру?
 4. Сформулюйте правило, за яким складається рівняння теплового балансу.

ВПРАВА 7

1. У залізний котел масою 10 кг налито 20 кг води температурою 10 °C. Яку кількість теплоти потрібно надати котлу з водою, щоб вона закипіла за нормального атмосферного тиску?
2. Змішали 0,8 кг води, що має температуру 25 °C, з 0,2 кг окропу. Яка встановилася температура суміші? Яку кількість теплоти віддав окріп? Яку кількість теплоти отримала вода?
3. У калориметр, в якому було 1 кг води з температурою 20 °C, налили воду температурою 80 °C. Через деякий час у калориметрі встановилася температура 30 °C. Скільки гарячої води долили в калориметр?
4. У калориметр, в якому міститься 200 г води з температурою 10 °C, поклали мідний брусок масою 50 г, температура якого 100 °C. Визначити температуру калориметра після встановлення теплової рівноваги.

Досить часто людина отримує теплову енергію, спалюючи різні речовини. Наприклад, під час горіння природного газу (метану) утворюється оксид карбону (вуглецю) і вода, а також виділяється певна кількість теплоти.

З атомно-молекулярного вчення щодо будови речовини тепловий ефект процесу горіння пояснюється виділенням енергії під час утворення нової молекули. Так, у результаті взаємодії молекул метану CH_4 з молекулами кисню O_2 утворюються молекули оксиду карбону (вуглецю) CO_2 і води H_2O . Це супроводжується виділенням певної кількості теплоти. Наприклад, під час згоряння 1 м^3 природного газу, що на 90 % складається з метану, утворюється приблизно 40 МДж теплоти.

У промисловості та побуті для отримання тепла внаслідок горіння використовують паливо. Є різні види палива: тверде (вугілля, дрова, сланці, торф), рідке (бензин, гас, дизпаливо, мазут, спирт), газоподібне (ацетилен, метан, пропан, етилен). Природно, що енергетичний ефект від їх спалювання буде різним. Тому теплотворна здатність палива характеризується фізичною величиною, що називається *питомою теплотою згоряння палива* (позначається q). Її числове значення показує, яка кількість теплоти виділяється під час повного згоряння 1 кг палива. Як правило, питому теплоту згоряння палива визначають експериментально.

Для того щоб обчислити кількість теплоти, яка виділяється під час згоряння довільної кількості палива, треба питому теплоту згоряння палива помножити на його масу:

$$Q = qm.$$

Горіння — це особливий тип хімічної реакції окиснення, яка супроводжується інтенсивним виділенням теплової енергії

Кількості теплоти, що виділяється під час згоряння 1 м^3 природного газу, вистачає, щоб нагріти майже 100 л води від 0 до 100°C

Паливо — це речовини, які в результаті згоряння дають значний тепловий ефект

Під час згоряння 1 кг палива одні речовини виділятимуть більшу кількість теплоти, інші — меншу

Питома теплота згоряння палива характеризує теплотворну здатність речовини

$$Q = qm$$

Одиницею питомої теплоти згоряння палива є джоуль на кілограм (Дж/кг).

Таблиця 4. Питома теплота згоряння деяких видів палива

Паливо	q, кДж/кг	Паливо	q, кДж/кг
Антрацит	30000	Ацетилен	50000
Буре вугілля	12000	Бензин	44000
Дрова (сухі)	12000	Газ	43000
Кам'яне вугілля	25000	Дизпаливо	42000
Порох	5000	Мазут	39000
Сланці	10000	Нафта	45000
Солома	14000	Природний газ	45000
Торф	15000	Пропан	46000
Троїла (підбухівка)	15000	Спирт	26000

Енергетичний ефект від спалювання палива характеризується питомою теплотою його згоряння

За значенням питомої теплоти згоряння палива (табл. 4) можна встановити, скільки теплоти виділиться внаслідок повного згоряння 1 кг палива. Наприклад, під час спалювання 1 кг антрациту виділяється приблизно 30000 кДж теплоти, а під час згоряння 1 кг дров можна отримати лише 12000 кДж теплоти.

За значенням питомої теплоти згоряння палива можна встановити, скільки теплоти виділиться внаслідок повного згоряння 1 кг палива

Приклад. Яка кількість теплоти утвориться у разі згоряння 40 кг кам'яного вугілля? Скільки води можна підігріти від 10 до 60 °С, якщо на її нагрівання витрачається половина отриманої енергії?

Дано:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 40 \text{ кг} \\
 q &= 25000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\
 c &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\
 t_1 &= 10 \text{ }^\circ\text{C} \\
 t_2 &= 60 \text{ }^\circ\text{C} \\
 Q &= ? \quad m_2 = ?
 \end{aligned}$$

Розв'язання:

$$Q = qm_1; Q = 25 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 40 \text{ кг} = 1000 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1000 \text{ МДж}.$$

Оскільки на нагрівання води пішла лише половина теплоти, то

$$0,5Q = cm_2\Delta t.$$

$$\text{Звідси, } m_2 = \frac{0,5Q}{c\Delta t} = \frac{500 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 50 \text{ К}} = 2400 \text{ кг}.$$

Відповідь. Під час згоряння вугілля виділиться 1000 МДж теплоти, за допомогою якої можна нагріти 2400 кг води, якщо 50 % теплоти піде на нагрівання.

- ?
1. Що таке горіння?
 2. Як можна пояснити виділення теплоти під час горіння на основі атомно-молекулярного вчення?
 3. Який фізичний зміст питомої теплоти згоряння палива?
 4. Яка речовина має найбільшу (найменшу) теплотворну здатність (див. табл. 4)?
 5. Чому для опалення будинків використовують вугілля, природний газ чи рідке паливо, а не дерево і соломку?

ВПРАВА 8

1. При повному згорянні бензину виділилося $1,63 \cdot 10^7$ кДж теплоти. Скільки бензину спалено?
2. Скільки дров треба спалити, щоб отримати таку саму кількість теплоти, як від спалювання 1,5 кг бензину?
3. Скільки газу треба спалити, щоб нагріти 3 л води від 20°C до кипіння, якщо на її нагрівання пішло 60 % енергії?
4. До якої температури можна нагріти 50 л води, температура якої 20°C , спаливши 0,1 кг бензину?

§ 11. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ У МЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСАХ

Здавна люди помітили, що температура тіла, а отже і його внутрішня енергія, може збільшуватися за рахунок тертя. Так, свердління супроводжується підвищенням температури свердла і деталі, в якій робиться отвір; гальмівні колодки автомобіля нагріваються під час гальмування тощо.

Така зміна внутрішньої енергії тіл відбувається не сама по собі, а через певні умови. Мається на увазі, що при всіх перетвореннях механічної енергії у внутрішню справджується *закон збереження енергії*: зменшення механічної енергії за рахунок дії сил тертя й опору кількісно дорівнює збіль-

Внутрішня енергія тіла може змінитися внаслідок виконання механічної роботи

шенню внутрішньої енергії всіх тіл, що беруть участь у цій взаємодії.

Як уже зазначалося вище (див. § 5), зміна внутрішньої енергії може статися унаслідок виконання роботи чи теплообміну: під час теплопередачі, що веде до підвищення температури тіла, або зміни агрегатного стану речовини, що супроводжується виділенням або поглинанням певної кількості теплоти.

Зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює сумі виконаної роботи і кількості теплоти, яка передана тілу.

Так, якщо тілу надати певної кількості теплоти, то воно спроможне буде виконати роботу. Наприклад, нагрівання газу в циліндрі під поршнем спричинює підняття вантажу на деяку висоту (мал. 1.16). Разом з тим частина теплоти, що надана тілу, піде на збільшення його внутрішньої енергії. Це пояснюється тим, що не можна перетворити в механічну енергію всю теплоту, передану тілу.

Отже, можна зробити висновок, що кількість теплоти, передана тілу, частково йде на збільшення його внутрішньої енергії, а частково на виконання ним роботи. На цьому побудована робота теплових машин, зокрема двигунів внутрішнього згоряння, з принципом дії яких ми ознайомимось далі.

На підставі цього твердження англійський фізик В. Томсон (лорд Кельвін) відкрив фундаментальний закон природи: не можна побудувати теплову машину, яка б перетворювала в механічну роботу всю надану їй теплоту. Тобто цим висновком він заперечував можливості створення вічного двигуна — такої машини, яка б спроможна була необмежено довго виконувати роботу без запозичення енергії ззовні.



Мал. 1.16. Нагрівання газу в циліндрі під поршнем зумовлює підняття вантажу на певну висоту

Паризька академія наук ще у 1775 р. ухвалила рішення не розглядати проекти вічних двигунів як такі, що суперечать фундаментальному закону природи — закону збереження енергії

- ?
1. Наведіть приклади перетворення механічної енергії у внутрішню.
 2. Сформулюйте закон збереження енергії для механічних і теплових процесів.
 3. Який висновок можна зробити щодо передавання теплової енергії тілам?
 4. Чому неможливий вічний двигун?

§ 12. ПЛАВЛЕННЯ І КРИСТАЛІЗАЦІЯ РЕЧОВИНИ

Ми звикли до того, що тіла, які нас оточують, перебувають у цілком визначених агрегатних станах. Проте нам також добре відомо, що зміна температури може спричинити якісні перетворення їхніх властивостей: тверді тіла можуть стати рідинами або останні, навпаки, — затверднути (наприклад, утворення льоду і його танення); гази можуть бути скраплені чи рідина перейти в газоподібний стан.

Якщо твердому тілу надавати теплоту, то його температура поступово підвищуватиметься, а з досягненням певної температури воно почне плавитися. На цьому явищі ґрунтуються багато технологічних процесів. Наприклад, металурги завдяки плавленню руди «варять» сталь і добувають інші метали; ливарники відливають деталі різної форми; стоматологи виготовляють коронки для зубів тощо.

Тепловий процес, під час якого тверде тіло переходить у рідкий стан, називається *плавленням*. Температура, за якої відбувається плавлення, називається *температурою плавлення*. Наприклад, за нормальних умов для вольфраму вона становить 3387°C , для сталі — $1300\ldots 1500^{\circ}\text{C}$, для алюмінію — 660°C , для олова — 232°C . Алмаз витримує температуру понад 3500°C , а ртуть плавиться при -39°C .

За звичайних умов лід, дерево, залізо та інші метали — це тверді тіла; вода, бензин, ацетон — рідини; а кисень, водень, азот, повітря — гази

Якщо твердому тілу надавати теплоту, то його температура поступово підвищуватиметься, а з досягненням певної температури воно почне плавитися

Речовини мають різну температуру плавлення

Плавлення відбувається обов'язково з поглинанням теплоти, коли тіло досягає температури плавлення. Якщо припинити передавання тілу теплоти, то зупиниться і сам процес плавлення.

Це пояснюється тим, то для послаблення зв'язків між атомами чи молекулами в твердому тілі необхідна додаткова енергія, яка йде на руйнування їх упорядкованого розміщення. Під час плавлення температура тіла не змінюється, оскільки вся енергія спрямована на цю руйнацію.

Очевидно, що різним речовинам для перетворення їх у рідину потрібна неоднакова кількість енергії, адже їхні атоми і молекули взаємодіють між собою з різною силою. З огляду на це для характеристики енергетичних витрат, необхідних для переходу речовини з твердого стану в рідкий, застосовують фізичну величину, яка називається *питомою теплотою плавлення*.

Питома теплота плавлення — це фізична речовина, що дорівнює кількості теплоти, яка необхідна для перетворення 1 кг речовини з твердого стану в рідкий за температури плавлення. Питома теплота плавлення позначається літерою L і вимірюється в джоулях на кілограм (Дж/кг). Значення температури плавлення та питомої теплоти плавлення окремих речовин наведено у табл. 5.

Лід, що плаває у воді при 0 °С, буде танути лише за умови надання йому теплоти; і навпаки, відведення теплоти призведе до утворення нового льоду

Різні речовини мають різну питому теплоту плавлення

$$L = \frac{Q}{m}$$

Таблиця 5. Температура плавлення та питома теплота плавлення деяких речовин

Речовина	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$L, \text{кДж/кг}$	Речовина	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$L, \text{кДж/кг}$
Алюміній	660	393	Платина	1772	113
Вольфрам	3387	185	Ртуть	-39	12
Залізо	1535	270	Свинць	327	24
Золото	1065	67	Срібло	962	87
Лід	0	332	Спирт	-115	105
Мідь	1085	213	Титан	1660	470
Нафталін	80	151	Цинк	420	112
Олово	232	58	Чавун	1200	96

Наприклад, питома теплота плавлення льоду становить 332 кДж/кг. Це означає, що для того, щоб розтанув 1 кг льоду при 0 °С, потрібно надати йому 332 кДж теплоти.

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для плавлення твердого тіла, треба питому теплоту плавлення речовини L помножити на масу тіла m :

$$Q_{пл} = Lm.$$

Приклад 1. Скільки кам'яного вугілля треба спалити, щоб розплавити 2 т чавуну за температури плавлення. Вважати, що вся енергія палива пішла на плавлення чавуну.

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг}$$

$$L = 96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$q = 25 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання:

За означенням теплота плавлення дорівнює:

$$Q_1 = Lm_1.$$

Кількість теплоти, яка виділиться під час згоряння кам'яного вугілля, дорівнює:

$$Q_2 = qm_2.$$

Оскільки за умовою $Q_1 = Q_2$, то $Lm_1 = qm_2$.

$$\text{Звідси } m_2 = \frac{Lm_1}{q};$$

$$m_2 = \frac{96\,000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 2\,000 \text{ кг}}{25\,000\,000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 7,7 \text{ кг}.$$

Відповідь. Для плавлення 2 т чавуну треба спалити 7,7 кг кам'яного вугілля.

Так само, як тверді тіла при наданні їм теплоти плавляться, рідини, якщо вони втрачають енергію, тверднуть.

Так, спирт твердне при -115 °С, ацетон при -95 °С, бензин при -60 °С, олія при -16 °С тощо.

Процес переходу рідин у твердий стан називається кристалізацією. Це тепловий процес, протилежний до плавлення.

Кристалізація рідин супроводжується виділенням теплоти, тому що упорядкування атомів і молекул вивільнює частину енергії. Кількість теплоти, яка при цьому виділя-

Тверднення рідин відбувається за тієї самої температури, за якої тверді тіла плавляться

ється, визначається добутком питомої теплої плавлення L на масу твердого тіла m , що утворилося в результаті кристалізації:

$$Q_{кр} = Lm.$$

$$Q_{кр} = Lm$$

Приклад 2. Скільки теплової енергії виділиться з утворенням 5 кг льоду?

<p><i>Дано:</i></p> <p>$m = 5 \text{ кг}$</p> <p>$L = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$</p> <p>$Q_{кр} = ?$</p>	<p><i>Розв'язання:</i></p> <p>За означенням кількість теплоти, яка виділиться під час кристалізації речовини, дорівнює</p> <p>$Q_{кр} = Lm;$</p> <p>$Q_{кр} = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ кг} = 1660 \text{ кДж}.$</p>
--	--

Відповідь. У разі утворення 5 кг льоду виділиться 1660 кДж теплоти. Ця енергія еквівалентна кількості теплоти, яку треба витратити, щоб нагріти від 0 °С до кипіння 4 кг води.

Теплові процеси плавлення і кристалізації відбуваються за сталої температури, оскільки під час цих процесів відбуваються структурні зміни упорядкування атомів і молекул речовини у кристалічні ґратки або, навпаки, їх руйнування. Очевидно, що внаслідок цих процесів змінюється внутрішня енергія тіла. Кількісно цю зміну характеризує *питома теплота плавлення (кристалізації)*. Вона показує, на скільки відрізняється внутрішня енергія тіла масою 1 кг у разі переходу з одного агрегатного стану в інший. У цьому полягає її фізичний зміст.

Слід мати на увазі, що все, про що йшлося вище, стосується плавлення і тверднення лише так званих *кристалічних тіл*. Тільки в таких тілах температура плавлення і кристалізації (тверднення) є сталою. Існує багато речовин, які не мають сталої температури плавлення і тверднення, наприклад віск, смола тощо. Такі речовини називаються *аморфними*.

Питома теплота плавлення (кристалізації) показує, на скільки відрізняється внутрішня енергія тіла масою 1 кг у разі переходу з одного агрегатного стану в інший

Кристалічні тіла, на відміну від аморфних, мають сталу температуру плавлення і кристалізації

- ?
1. Який процес називається плавленням?
 2. Охарактеризуйте умови плавлення твердих тіл? Назвіть усі теплові процеси, що відбуваються під час плавлення металу в печі.
 3. Який фізичний зміст питомої теплоти плавлення?
 4. Скільки свинцю можна розплавити за температури плавлення, надавши йому 12 кДж теплоти?
 5. Як називається тепловий процес, протилежний до плавлення?
 6. Чому в тиху погоду, коли випадає сніг, стає тепліше?

§ 13. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ ПЛАВЛЕННЯ І КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТІЛ

Рівняння теплового балансу як загальний вираз закону збереження енергії у теплових процесах справедливе і для випадків плавлення та кристалізації тіл. Тому при його складанні можна керуватися висновками і правилами, сформульованими в § 9. Проте під час розв'язування задач, в умові яких передбачено плавлення чи кристалізацію тіл, слід дотримуватися певних правил.

По-перше, необхідно пам'ятати, то плавлення чи кристалізація тіл відбуваються за умови досягнення ними певної температури — температури плавлення (кристалізації). З огляду на це інколи слід враховувати кількість теплоти, необхідну для нагрівання чи охолодження тіла до температури плавлення (кристалізації).

По-друге, плавлення твердого тіла буде відбуватися, якщо воно отримуватиме теплоту, і, навпаки, рідина буде кристалізуватися, якщо втрачатиме теплову енергію. При цьому температура тіла не змінюватиметься.

Таким чином, ці правила визначають певну послідовність дій, якої доцільно до-

У складанні рівняння теплового балансу для процесів плавлення і кристалізації існують певні особливості

Плавлення чи кристалізація тіл відбуваються за умови досягнення ними певної температури — температури плавлення (кристалізації)

Плавлення кристалічного твердого тіла буде відбуватися, якщо воно отримуватиме теплоту, і, навпаки, рідина буде кристалізуватися, якщо втрачатиме теплову енергію. При цьому температура тіла не змінюватиметься

тримуватися під час розв'язування задач з урахуванням процесів плавлення чи кристалізації тіла:

- з умови задачі з'ясувати температуру тіл, які перебувають у теплообміні. Якщо вона більша або менша за температуру плавлення, врахувати це при складанні рівняння;

- установити, які теплові процеси відбуваються за умовою задачі. Записати формулу кількості теплоти для кожного з них;

- скласти рівняння і розв'язати його відносно шуканої величини;

- якщо в теплообмінному процесі перебувають кілька тіл, одні з яких отримують тепло, а інші віддають його, скласти рівняння теплового балансу: у лівій його частині записати суму кількості теплоти, яку отримували тіла, перебуваючи в теплообміні; у правій частині — суму кількості теплоти, яку віддали тіла в результаті цього;

- розв'язати це рівняння відносно шуканої величини.

Послідовність кроків під час розв'язування задач

1-й крок

2-й крок

3-й крок

4-й крок

5-й крок

Приклад 1. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб розплавити 10 кг алюмінію, взятого за кімнатної температури?

Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$L = 393 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$t_{\text{пл}} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$Q = ?$$

Розв'язання:

Щоб розплавити алюміній, його спочатку треба нагріти до температури плавлення ($660 \text{ }^{\circ}\text{C}$), витративши кількість теплоти

$$Q_1 = cm(t_{\text{пл}} - t_0).$$

На сам процес плавлення алюмінію піде кількість теплоти

$$Q_2 = Lm.$$

$$\text{Отже, } Q = Q_1 + Q_2 = cm(t_{\text{пл}} - t_0) + Lm.$$

$$Q = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ кг} \cdot 640 \text{ }^{\circ}\text{C} + 393 \text{ 000} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 10 \text{ кг} = 9 \text{ 690 000 Дж} = 9,7 \text{ МДж}.$$

Відповідь. Для плавлення 10 кг алюмінію треба 9,7 МДж теплоти.

Приклад 2. Внутрішня енергія 5 кг води, що перебувала за кімнатної температури, в результаті теплообміну зменшилася на 1 МДж. Що сталося з водою? Скільки утворилося льоду?

Дано:

$$\Delta U = 1 \text{ МДж}$$

$$m_1 = 5 \text{ кг}$$

$$L = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$t_{\text{пл}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання:

Очевидно, що зменшення внутрішньої енергії води ΔU насамперед спричинило її охолодження до температури кристалізації ($0 \text{ }^{\circ}\text{C}$):

$$Q_1 = c m_1 \Delta t.$$

$$Q_1 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 5 \text{ кг} \cdot 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 420 \text{ кДж}.$$

Решта енергії виділилася в результаті утворення льоду:

$$Q_2 = \Delta U - Q_1 = L m_2.$$

$$\text{Звідси } m_2 = \frac{\Delta U - Q_1}{L}.$$

$$m_2 = \frac{580 \text{ кДж}}{332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 1,75 \text{ кг}.$$

Відповідь. Утвориться 1,75 кг льоду.

ВПРАВА 9

1. Яка кількість теплоти потрібна, щоб розплавити 2,5 кг міді за температури плавлення?
2. Яка кількість теплоти виділиться під час кристалізації 200 г алюмінію і охолодження його до кімнатної температури?
3. У посудині з водою, маса якої 2 кг, за температури $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ плаває 0,5 кг льоду. Скільки теплоти треба витратити, щоб довести воду до кипіння за нормального атмосферного тиску?
4. У 1 кг води, температура якої $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, опустили кусок льоду за температури $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Після того, як лід розтав, температура води стала $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Скільки льоду кинули у воду?
5. Скільки льоду, температура якого $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, може розплавити залізна куля масою 0,5 кг, охолоджуючись від 400 до $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$? Вважати, що вся енергія піде на плавлення льоду.

У житті ми досить часто спостерігаємо, коли рідина під дією зовнішніх умов з часом зникає: висихають калюжі після дощу, сохне випрана білизна, рівень води у відкритих водоймах улітку знижується тощо. Куди ж поділася рідина? Ми кажемо, що рідина випарувалася.

Явище переходу рідин у газоподібний стан називається *випаровуванням*.

Випаровування властиве не лише рідинам, а й твердим тілам (пригадайте, що білизна висихає також узимку, в морозну погоду). У твердих тіл цей процес називається *сублімацією*, або *возгонкою*.

Випаровування рідин відбувається з поглинанням енергії. Енергетичні витрати на випаровування рідин характеризує *питома теплота пароутворення*. **Питома теплота пароутворення визначає кількість теплоти, необхідну для випаровування 1 кг рідини за певної температури.** Вона позначається літерою r і вимірюється у джоулях на кілограм (Дж/кг).

Значення питомої теплоти пароутворення конкретної речовини залежить від різних факторів, зокрема від температури. Наприклад, питома теплота пароутворення води при 0°C дорівнює $2\,500\text{ Дж/кг}$, при 20°C — $2\,454\text{ Дж/кг}$, за температури кипіння (100°C) — $2\,257\text{ Дж/кг}$. Це означає, що для випаровування 1 кг води, взятої при 0°C , треба витратити 2500 Дж теплоти, а при 100°C — $2\,257\text{ Дж}$.

Фізичний зміст питомої теплоти пароутворення полягає в тому, що вона кількісно визначає, *на скільки відрізняється за даної температури внутрішня енергія тіла масою 1 кг у разі переходу з рідкого стану в газоподібний*. Наприклад, внутрішня енергія 1 кг

3 часом рідини випаровуються

Сублімація, або возгонка, — це «випаровування» твердих тіл

Питома теплота пароутворення визначає кількість теплоти, необхідну для випаровування 1 кг рідини за певної температури

$$r = \frac{Q}{m}$$

Чим вища температура рідини, тим менше енергії треба витратити, щоб її випарувати

водяної пари при 100 °С більша від внутрішньої енергії води за цієї самої температури на 2257 кДж.

Конкретні значення питомої теплоти пароутворення деяких речовин за температури кипіння і нормального атмосферного тиску наведено у таблиці.

Таблиця 6. Питома теплота пароутворення деяких речовин

Речовина	$t_k, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	Речовина	$t_k, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$
Аміак (рідкий)	-33	1370	Гліцерин	290	830
Ацетон	57	520	Ртуть	357	290
Бензин	70...200	290	Спирт	78	900
Вода	100	2257	Етер	35	355

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для випаровування певної маси рідини, треба її питому теплоту пароутворення r помножити на масу m :

$$Q_n = rm.$$

Приклад 1. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб нагріти 5 кг води від 0 °С до кипіння і випарувати її повністю за нормального атмосферного тиску?

Дано:

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q = ?$$

Розв'язання:

За умовою воду спочатку нагрівають (Q_1), а потім випаровують (Q_2).

$$\text{Отже, } Q = Q_1 + Q_2;$$

$$Q_1 = cm\Delta t, \quad Q_2 = rm;$$

$$Q = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 5 \text{ кг} \cdot 100 \text{ К} + 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ кг} = 13\,600\,000 \text{ Дж} = 13,6 \text{ МДж}.$$

Відповідь. Для нагрівання і випаровування 5 кг води потрібно 13,6 МДж теплоти.

У природі спостерігається і зворотний до випаровування процес, коли за певних умов газ скраплюється і утворюється рідина. Наприклад, улітку вранці досить часто випадає роса, восени у разі різкого зниження температури утворюється туман тощо.

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

Як правило, вона відбувається на поверхні рідини або твердого тіла чи вимагає

Процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називається конденсацією

навинності в газі центрів конденсації, роль яких відіграють різні домішки або пилинки. Явище конденсації широко використовується у холодильній техніці, у різних хімічних технологіях, під час опріснення води.

Конденсація супроводжується виділенням теплоти, яка кількісно визначається за тією самою формулою, що й теплота випаровування:

$$Q_k = \tau m.$$

$$Q_k = \tau m$$

За певних умов можливий перехід речовини з газоподібного стану в твердий без конденсації. Так, наприклад, з водяної пари взимку утворюються сніжинки та іній (паморозь), чудові візерунки на вікнах.

Приклад 2. Яка кількість теплоти виділиться при конденсації 200 г водяної пари за температури 100 °С? Порівняйте її з кількістю теплоти, що потрібна для нагрівання такої самої маси води від 0 до 100 °С.

Дано:

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

$$\tau = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_k = ?$$

Розв'язання:

За означенням $Q_k = \tau m$;

$$Q_k = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,2 \text{ кг} = 460 \text{ кДж};$$

$$Q = cm\Delta t,$$

$$Q = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 100 \text{ }^\circ\text{C} = 84 \text{ кДж};$$

$$\frac{Q_k}{Q} = \frac{460 \text{ кДж}}{84 \text{ кДж}} = 5,5.$$

Відповідь. При конденсації пари виділяється 460 кДж теплоти; це в 5,5 разів більше, ніж потрібно для нагрівання такої самої маси води від 0 до 100 °С.

- ?
1. Як називається явище переходу речовини з рідкого стану в газоподібний?
 2. Дайте визначення питомої теплоти пароутворення. Який її фізичний зміст?
 3. Питома теплота пароутворення ацетону 520 кДж/кг. Що це означає?
 4. Як називається процес, зворотний до випаровування? Чим вони відрізняються з енергетичної точки зору?

Як відомо, надання рідині теплоти викликає спочатку підвищення її температури, яке згодом може призвести до кипіння. *Кипіння — це різновид випаровування рідини.* Розглянемо це явище докладніше.

Наллємо у прозору скляну колбу води і будемо нагрівати її, спостерігаючи за плинним явищем (мал. 1.17). Спочатку, у разі під-

Перетворення рідини в пару відбувається внаслідок її випаровування з вільної поверхні на межі з газом



Мал. 1.17. Закипання води

вищення температури, на дні і стінках посудини утворюватимуться бульбашки. Це пояснюється тим, що в рідині містяться молекули газу (у даному випадку — повітря), які розчиняються в ній. З підвищенням температури ці бульбашки, що збираються на дні і стінках посудини, а також бульбашки, що є в самій рідині, почнуть збільшуватися. Відбувається внутрішнє випаровування й утворення всередині рідини подійної пари.

Нагрівання води спричинює збільшення об'єму бульбашок у ній. Тому настане момент, коли вони під дією сили Архімеда почнуть спливати на поверхню (мал. 1.18). У разі досягнення поверхні бульбашки з паром будуть із шумом лопатися, тобто настає кипіння рідини. Теплота, яка при цьому надається рідині, витрачається на її



Мал. 1.18. Утворення бульбашок пари під час кипіння

внутрішнє випаровування в усьому об'ємі. Тому температура рідини під час кипіння не зростає і залишається сталою.

Отже, кипіння — це внутрішнє випаровування рідини, внаслідок якого всередині її об'єму утворюються бульбашки пари, що спливають і викидають її назовні.

Температура, за якої рідина кипить, називається *температурою кипіння*. Кожній речовині властива певна температура кипіння (див. табл. 6).

Температура кипіння рідин залежить від зовнішнього тиску, оскільки бульбашкам пари для виходу назовні треба подолати його протидію. Цим, зокрема, пояснюється, що у горах вода кипітиме за значно нижчої температури, ніж за нормального атмосферного тиску.

Отже, збільшуючи зовнішній тиск, можна підвищувати температуру кипіння рідини. Так, у каstrулях-швидковарках із щільно припасованою кришкою вода нагрівається до 120...150 °C за рахунок того, що всередині їх тиск становить 2...5 гПа.

Залежність температури кипіння від тиску можна спостерігати на досліді.

Помістимо під ковпак посудину з водою, температура якої значно нижча від температури кипіння за нормальних умов ($t = 100\text{ °C}$). Почнемо відкачувати з-під ковпака повітря, знижуючи тим самим тиск. Через деякий час у воді на дні і стінках посудини та всередині рідини почнуть утворюватися бульбашки. Подальше зниження тиску приведе до того, що бульбашки спливатимуть, вода закипить. Тобто ми спостерігаємо всі ознаки кипіння, хоча воді не надається додаткова кількість теплоти внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем. Але сама вода при цьому охолоджується.

Кипіння — це внутрішнє випаровування рідини, внаслідок якого всередині її об'єму утворюються бульбашки пари, що спливають і викидають її назовні

Чим більший зовнішній тиск, тим вищою буде температура кипіння, і навпаки, зі зменшенням тиску знижується температура кипіння

У спеціальних котлах і автоклавах, в яких тиск досягає 100 гПа (100 атм), воду можна нагріти до 300 °C

Температура під час кипіння залишається сталою

- ?
1. Яка сутність явища кипіння?
 2. Що таке температура кипіння? Від чого вона залежить?
 3. Чому в таблицях наводять температуру кипіння речовин за нормального атмосферного тиску?
 4. Чому у гірській місцевості вода кипить за нижчої температури, ніж біля підніжжя гір?

§ 16. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ І КОНДЕНСАЦІЇ

Для розв'язування задач, у яких передбачено випаровування чи конденсацію рідини, можна так само, як і для будь-яких теплових процесів, застосовувати рівняння теплового балансу (див. § 9).

По-перше, слід пам'ятати, що випаровування рідин, на відміну від плавлення і кристалізації твердих тіл, відбувається за будь-якої температури. Тому у розрахунках кількості теплоти треба брати відповідне значення питомої теплоти пароутворення для даної температури $Q_1 = rm$. Якщо в умові задачі воно не зазначається, то передбачають її такою, як і для температури кипіння. Проте у такому разі рідину необхідно нагріти до цієї температури, надавши їй певної кількості теплоти $Q_2 = cm\Delta t$.

Тобто, загальна кількість теплоти дорівнюватиме: $Q = Q_1 + Q_2$.

По-друге, слід враховувати, що конденсація пари в рідину відбувається за певних фізичних умов, які залежать від тиску і температури речовини. Тому цей процес відбувається за певних їхніх значень, які обов'язково зазначаються в умові задачі. Недотримання цих умов виключає можливість самого явища.

По-третє, при складанні рівняння треба брати до уваги, що випаровування рідини

Під час складання рівняння теплового балансу для процесів випаровування і конденсації слід урахувати особливості перебігу цих явищ

$$Q_n = rm$$

$$Q = cm\Delta t$$

Конденсація пари залежить від фізичних умов

вимагає надання їй певної кількості теплоти, а конденсація пари в рідину, навпаки, супроводжується виділенням теплоти.

Приклад 1. Посудині, в якій міститься 2 кг води при 20 °С, передано 1050 кДж теплоти. Скільки води при цьому випарувалося?

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ кг}$$

$$r_{20} = 2450 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$r_{100} = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$m_2 = ?$$

Розв'язання:

Оскільки в умові задачі не сказано, як відбувався процес випаровування — з нагріванням до температури кипіння і подальшим випаровуванням чи безпосередньо при 20 °С, розглянемо обидва випадки:

$$1) Q = rm_2; \text{ звідси } m_2 = \frac{Q}{r},$$

$$m_2 = \frac{1050 \text{ кДж}}{2450 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,43 \text{ кг};$$

$$2) Q = cm_1 \Delta t + rm_2; \text{ звідси } m_2 = \frac{Q - cm_1 \Delta t}{r},$$

$$m_2 = \frac{1050 \text{ кДж} - 670 \text{ кДж}}{2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,17 \text{ кг}.$$

Відповідь. Залежно від способу випаровування за допомогою 1050 кДж теплоти можна випарувати 0,43 кг або 0,17 кг води.

Приклад 2. В алюмінієвий калориметр масою 0,5 кг, в якому знаходиться 1 кг води при 10 °С, впустили 100 г водяної пари, температура якої 100 °С. Яка температура буде в калориметрі після встановлення теплової рівноваги? Втратами теплоти знехтувати.

Дано:

$$m_1 = 0,5 \text{ кг}$$

$$m_2 = 1 \text{ кг}$$

$$m_3 = 0,1 \text{ кг}$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$t_1 = t_2 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_3 = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c_1 = 880 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$t = ?$$

Розв'язання:

У теплообмінному процесі перебувають: водяна пара і вода, що утворилася в результаті конденсації, які віддають теплоту, та калориметр і вода в ньому, які отримують теплоту.

Складемо рівняння теплового балансу: у лівій його частині запишемо кількість теплоти, яку отримали калориметр і вода в ньому; у правій частині — кількість теплоти, яку віддали пара і утворена з неї вода у процесі остигання:

$$c_1 m_1 (t - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}) + c_2 m_2 (t - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}) = rm_3 + c_2 m_3 (100 \text{ }^{\circ}\text{C} - t).$$

Звідси, зробивши перетворення і розв'язавши рівняння відносно невідомого t , знайдемо:

$$5060t = 31840 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відповідь. У калориметрі встановиться температура 63 °С.

ВПРАВА 10

1. Яку кількість теплоти треба надати 50 г води, температура якої 0°C , щоб довести її до кипіння і перетворити половину її у пару?
2. В алюмінієвий калориметр масою 0,2 кг, в якому знаходиться 0,15 кг води температурою 10°C , випустили пару при температурі 100°C . Скільки потрібно пари, щоб у калориметрі встановилася температура 50°C ?
3. Якою була температура води, якщо для нагрівання 500 г води і перетворення 100 г її в пару було витрачено 420 кДж теплоти?
4. У посудину, де знаходиться 2 кг льоду з температурою -10°C , випустили 0,2 кг водяної пари за температури 100°C . Чи розплавився весь лід?

§ 17. ПОЯСНЕННЯ ЗМІНИ АГРЕГАТНИХ СТАНІВ РЕЧОВИНИ НА ОСНОВІ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЧЕННЯ

З курсу фізики для 7-го класу вам відомо, що перебування речовини у різних агрегатних станах пояснюється характером руху і взаємодією мікрочастинок, з яких вона складається. Залежно від співвідношення між потенціальною енергією взаємодії та кінетичною енергією руху мікрочастинок (див. § 4) речовина може перебувати в одному з трьох агрегатних станів — твердому, рідкому чи газоподібному.

Щоб зрозуміти сутність енергетичних перетворень, розглянемо зміни агрегатного стану речовини на прикладі води (мал. 1.19). Для спрощення розрахунків візьмемо 1 кг речовини.

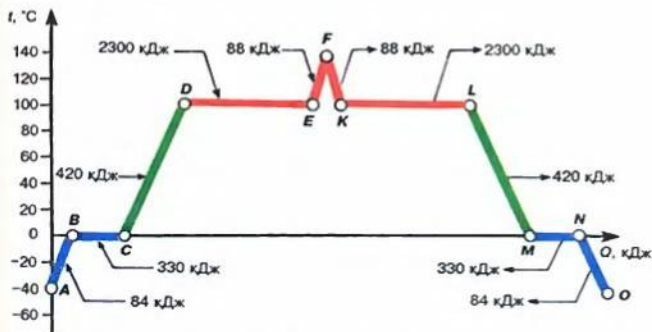
Візьмемо лід, температура якого, наприклад, -40°C , і будемо спостерігати за його станом під час теплообміну. Розглянемо процеси, які відбуваються під час його нагрівання й охолодження.

Спочатку термометр фіксуватиме підвищення температури льоду від -40°C до тем-

Зміна агрегатного стану речовини супроводжується відповідною зміною внутрішньої енергії тіла

Ділянка АВ — нагрівання льоду

пературі плавлення (ділянка AB), хоча його зовнішній вигляд практично не змінюватиметься. Кількість теплоти, яку треба надати



Мал. 1.19. Графік зміни агрегатного стану води (масштаби не дотримані)

льоду масою 1 кг , щоб нагріти його від -40 до 0°C , дорівнює

$$Q_{AB} = 2100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 40 \text{ K} = 84 \text{ кДж}.$$

$$Q_{AB} = c_d m \Delta t$$

Очевидно, що підвищення температури льоду впливатиме на рухливість його молекул: чим вища температура, тим інтенсивніше вони будуть коливатися, отже, тим більшою буде їхня кінетична енергія. Зростання ж кінетичної енергії молекул за рахунок наданої теплоти викликати послаблення зв'язків між ними. За температури плавлення (точка B) кінетична і потенціальна енергії молекул стають приблизно однаковими і зв'язки між ними можуть розриватися. Щоб це відбувалося і лід по-

Чим вища температура, тим інтенсивніше коливаються мікрочастинки тіла

чав танути (ділянка BC), йому необхідно надати певну кількість теплоти:

$$Q_{BC} = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ кг} = 330 \text{ кДж.}$$

При цьому утворюється суміш води і льоду і, як видно з графіка (ділянка BC), її температура не змінюється, оскільки вся теплова енергія йде на розривання жорстких зв'язків молекул між собою.

Коли весь лід розтане і утвориться вода (точка C), подальше нагрівання вестиме до підвищення її температури (ділянка CD). Кількість теплоти, яку треба витратити для нагрівання води, щоб довести її до температури кипіння (точка D), дорівнює

$$Q_{CD} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 100 \text{ К} = 420 \text{ кДж.}$$

Ця кількість теплоти, що надана воді, йде на збільшення кінетичної енергії руху молекул, підвищуючи їхню рухливість. Із зростанням температури зв'язки між молекулами послаблюються і стає можливим їх вихід за межі рідини, тобто відбувається випаровування води.

У разі досягнення температури 100°C (точка D) температура води припиняє зростати і залишається сталою навіть за умови подальшої теплопередачі. Настає кипіння води (ділянка DE), під час якого випаровування стає інтенсивнішим, а теплова енергія спрямовується на подолання потенціальної енергії взаємодії молекул і перетворення рідини в пару (газоподібний стан). Як видно з графіка, кипіння відбувається за певної температури і супроводжується поглинанням необхідної кількості теплоти.

Для перетворення води в пару за температури кипіння необхідно витратити кількість теплоти

$$Q_{DE} = 2300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1 \text{ кг} = 2300 \text{ кДж.}$$

Ділянка BC — танення льоду

$$Q_{BC} = Lm$$

Ділянка CD — нагрівання води

$$Q_{CD} = c_m \Delta t$$

При нагріванні води зростає кінетична енергія молекул

Ділянка DE — кипіння води

$$Q_{DE} = rm$$

Якщо продовжувати нагрівати утворену водяну пару в закритій посудині, то її температура зростатиме (ділянка EF). При цьому молекули вільно рухаються та взаємодіють між собою лише під час короткочасних зіткнень. Чим вища температура пари, тим швидше вони рухатимуться і в них стає менше можливостей взаємодіяти між собою. Щоб нагріти водяну пару, наприклад на 40°C , їй треба надати теплоту кількістю

$$Q_{EF} = 2200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 40 \text{ K} = 88 \text{ кДж}.$$

Отже, на прикладі води ми пересвідчилися, що:

1) надання тілу кількості теплоти супроводжується нагріванням або тепловими процесами (плавлення, випаровування, кипіння), внаслідок яких воно нагрівається і може змінювати свій агрегатний стан;

2) у певних межах інтервалу температур тіло зберігає свій агрегатний стан, а надана кількість теплоти йде на його нагрівання;

3) плавлення кристалічних тіл відбувається при сталій температурі за умови надання тілу теплоти;

4) під час кипіння рідини її температура залишається сталою.

Розглянемо тепер зворотні процеси, які відбуваються внаслідок теплообміну, коли теплова енергія відбирається, наприклад, якщо водяну пару помістити в холодильник.

Якщо водяну пару охолоджувати (ділянка FK), то швидкість хаотичного руху молекул буде зменшуватися. При цьому настає момент (точка K), коли водяна пара починає конденсуватися в рідину. За цих умов окремі молекули починають взаємодіяти між собою таким чином, що утримуються одна біля одної, не втрачаючи своєї рухливості.

Ділянка EF — нагрівання утвореної водяної пари

$$Q_{EF} = c_p m \Delta t$$

Ділянка FK — охолодження водяної пари

Утворення рідини з пари (ділянка KL) супроводжується виділенням такої самої кількості теплоти, яка потрібна була для випаровування 1 кг води:

$$Q = 2300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ кг} = 2300 \text{ кДж}.$$

Продовження теплообміну приведе до того, що вся пара сконденсується (точка L) і утворена вода почне охолоджуватися (ділянка LM).

За певної температури (для води це 0°C), якщо продовжувати відбирати тепло, зв'язки між молекулами посилюватимуться і вони поступово будуть втрачати рухливість. Настане момент (точка M), коли молекули почнуть займати фіксовані положення і коливатимуться навколо них. Тобто відбуватиметься кристалізація, рідина переходитиме у твердий стан (ділянка MN).

Кристалізація відбувається за тієї самої температури, що й плавлення. Вона супроводжується виділенням теплової енергії в кількості, яка витрачається у зворотному процесі — плавленні — для утворення рідини з твердого тіла. Так, під час кристалізації 1 кг льоду при 0°C навколишнє середовище (або холодильник) отримає 330 кДж теплоти. Подальше відбирання теплоти вестиме до зниження температури льоду (ділянка NO).

Таким чином, з графіка зміни агрегатних станів речовини видно, що перебіг зворотних теплових процесів (охолодження, конденсація, кристалізація) відбувається симетрично до процесів, які мали місце у разі надання теплоти (нагрівання, випаровування, плавлення). При цьому:

1) температури плавлення і кристалізації тіла однакові;

2) кількість теплоти, необхідна для плавлення твердого тіла, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється у разі утворення твердого тіла тієї самої маси;

Ділянка KL — конденсація пари у воду

$$Q_{KL} = rm$$

Ділянка LM — охолодження води

Ділянка MN — кристалізація води в лід

Ділянка NO — зниження температури льоду

У зворотних теплових процесах теплова енергія відбирається

3) пара конденсується за тієї самої температури, за якої дана рідина кипить;

4) кількість теплоти, яка поглинається під час випаровування рідини, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється у разі конденсації тієї самої маси газу або пари.

Розглянутий тут графік матиме симетричний вигляд лише за умови надання тілу теплоти, коли діє нагрівник зі сталою потужністю, а теплообміном із зовнішнім середовищем можна нехтувати. У разі відбирання теплоти використовується холодильник тієї самої потужності, що і нагрівник, а теплообміном із зовнішнім середовищем також можна нехтувати.

Графік зміни агрегатних станів речовини має симетричний вигляд

- ?
1. Поясніть, що відбуватиметься, якщо припинити нагрівання води в точці C , що на графіку (див. мал. 1.19)? Чи буде випаровуватися у цьому разі вода?
 2. Що станеться, якщо припинити теплообмін у точці, яка міститься посередині ділянки BC (див. мал. 1.19)?
 3. Що відбуватиметься, якщо посудину з водою покласти у морозильну камеру? Який графік зміни температури тіла ми отримаємо?
 4. Опишіть теплові процеси, що відбуватимуться після того, як припинити теплопередачу під час кипіння води? Чому її температура знижуватиметься?
 5. Що буде, якщо припинити теплообмін у точці, що міститься посередині ділянки KL ? графіка (див. мал. 1.19)? Чому змінюватиметься при цьому температура?
 6. У кювету з розплавленим металом при температурі плавлення кидають кусок цього самого металу. Чи розплавиться він, якщо додатково не надавати теплоти?

§ 18. ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В МЕХАНІЧНУ. ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВОЇ МАШИНИ

Споконвіку людина замислювалася над тим, як зробити механізми, які б допомагали їй виконувати важку роботу. Спочатку вона використовувала прості механізми —

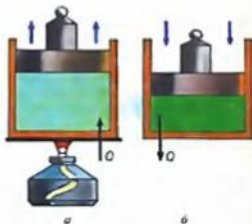
важілі, похилили площину, гвинт, різні передавальні механізми тощо. За їхньою допомогою людина вигравала у силі, але виконана механічна робота залишалася такою самою.

Відтоді як людство пізнало природу теплової енергії, вчені почали працювати над пошуком способу перетворення теплової енергії в механічну. У 1766 р. російський винахідник І. І. Ползунов створив парову машину, яка працювала на одному з гірничодобувних заводів. У 1784 р. англійський винахідник Дж. Уатт створив універсальний паровий двигун, який тривалий час був єдиним двигуном, що приводив у рух паровози й пароплави, і навіть перші автомобілі.

Щоб пояснити принцип дії теплової машини, зробимо дослід. Візьмемо, наприклад, циліндр з поршнем (мал. 1.20, а), на якому міститься гиря, і почнемо нагрівати газ під поршнем. З часом поршень переміститься вгору, оскільки під час нагрівання газ розширюватиметься. Отже, **внаслідок нагрівання газ виконає механічну роботу**, піднімаючи вантаж на певну висоту.

Якщо припинити нагрівання, газ під поршнем почне остигати і з часом поршень опускатиметься (мал. 1.20, б). Проте він не займе свого попереднього положення, оскільки температура газу буде вищою за початкову (адже тепла енергія не може безслідно зникнути).

Цей спосіб перетворення теплової енергії у механічну шляхом виконання роботи покладено в основу дії теплових машин. Назва «теплова машина» є загальним терміном, який характеризує механізми, що виконують роботу за рахунок теплової енергії. Це — парова і газова турбіни, двигуни внутрішнього згоряння, ракетний і турбореактивний двигуни, холодильник тощо.



Мал. 1.20. Виконання роботи внаслідок нагрівання й охолодження газу



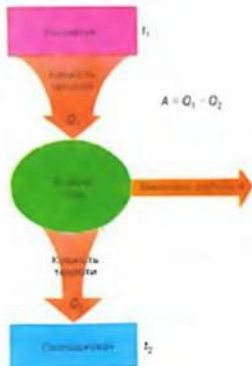
Томсон Вільям (лорд Кельвін) (1824—1907) — англійський фізик, один із засновників термодинаміки. Крім термодинаміки, чимало досліджень виконав з електромагнетизму, математики, техніки тощо. Увів 1848 року поняття про абсолютну температуру і її шкалу (шкала Кельвіна). Сконструював чутливі електрометри й гальванометри. У 1853 році розрахував частоту і період коливань в коливальному контурі, висунув у 1902 р. одну з гіпотез про будову атомів

У 1824 р. французький учений С. Карно визначив, що теплова машина повинна складатися з нагрівника (джерела теплоти), робочого тіла, яке власне виконує роботу (наприклад, пари), і охолоджувача (мал. 1.21). Така машина буде виконувати роботу лише тоді, коли температура охолоджувача буде нижчою за температуру нагрівника. За законом збереження енергії виконана робота тепловою машиною дорівнює $A = Q_1 - Q_2$. Коефіцієнт корисної дії такої машини становитиме

$$\text{ККД} = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Враховуючи, що $Q_2 < Q_1$, можна зробити висновок, що ККД теплової машини завжди менший за 1.

У 1851 р. англійський фізик В. Томсон (лорд Кельвін) сформулював твердження, що зіграло вирішальну роль у конструюванні теплових машин. Він установив, що *в природі неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплоти*. Цей висновок фактично означає, що не можна створити «вічний двигун», який би перетворив у роботу всю надану йому теплоту.



Мал. 1.21. Принцип дії теплової машини

- ?
1. Чому не можна створити «вічний двигун»?
 2. Що ми називаємо тепловою машиною?
 3. Хто вперше сконструював парову машину?
 4. Який фундаментальний висновок покладено в основу дії теплових машин?
 5. З яких трьох обов'язкових елементів складається будь-яка тепла машина?
 6. Чому температура охолоджувача має бути нижчою за температуру нагрівника?
 7. Чому ККД теплової машини завжди менший за 1?

ВПРАВА 11

1. Двигун внутрішнього згоряння автомобіля має потужність 37 кВт, а його ККД дорівнює 20 %. Яку кількість бензину він споживає за 1 год роботи?
2. Двигун трактора може розвивати потужність 60 кВт, споживаючи при цьому в середньому 18 кг дизельного пального за 1 годину. Визначте ККД цього двигуна.

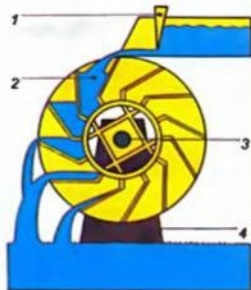
§ 19. ПАРОВА І ГАЗОВА ТУРБІНИ

Для перетворення теплової енергії у механічну на теплових і атомних електростанціях використовують турбіни. Турбіни як основний рушійний елемент застосовують також у газотурбінних двигунах, що широко використовуються в авіації. Залежно від робочого тіла (пари чи газу) розрізняють парові і газові турбіни.

В основу дії турбін покладено обертання колеса з лопатями під тиском водяної пари чи газу. Цю ідею людина здавна реалізувала в роботі вітряків і водяних млинів: потік води тисне на ковші колеса млина і під дією ваги води змушує їх обертатися (мал. 1.22).

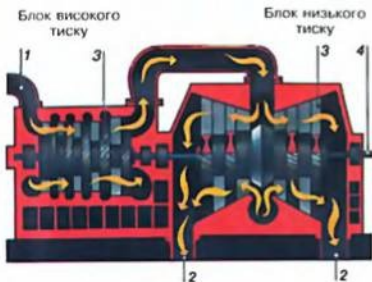
У парових турбінах перетворення енергії відбувається через різницю тисків водяної пари на вході (вхідний паропровід 1) і виході (вихідний паропровід 2) (мал. 1.23). Тому вона має блоки високого і низького тиску. На шляху водяної пари знаходяться робочі колеса 3 з лопатями, яких, як правило, кілька. Пара, що виробляється в паровому котлі теплоелектростанції, спрямовується під високим тиском по вхідному

Слово «турбіна» походить від латинського *turbo* — вихор, обертання з великою швидкістю



Мал. 1.22. Колесо водяного млина:

1 — регулювальна заслінка; 2 — кіш; 3 — робочий вал; 4 — опора



Мал. 1.23. Парова турбіна

паропроводу 1 до робочих коліс. Вона тисне на їхні лопаті, через що турбіна обертається.

Таким чином, теплова енергія водяної пари, виробленої в теплоенергетичній установці електростанції, завдяки турбіні перетворюється в механічну енергію. У свою чергу, за допомогою особливого пристрою, який називається генератором, механічна енергія перетворюється в електричну.

Парові турбіни сучасних теплових електростанцій розвивають потужність до 1300 МВт.

У газових турбінах додатково встановлюють спеціальну камеру згоряння, до якої упорскується паливо. Стиснуте в ній повітря має дуже високу температуру, і тому упорнуте паливо запалюється. Відбувається стрімке підвищення його температури. Під високим тиском газ тисне на лопаті робочого колеса, обертаючи газову турбіну. Частина енергії вона віддає компресору, який нагнітає повітря в камеру згоряння. Інша її частина йде на виконання роботи рушійним елементом газотурбінного двигуна, наприклад гвинтом літа-

Теплоенергетична установка перетворює теплову енергію в механічну

Газова турбіна відрізняється від парової тим, що в ній є спеціальна камера згоряння, яка підвищує енергетичну ефективність установки

ка, колесом автомобіля, валом електродвигателя тощо.

Потужність сучасних газових турбін досягає 100...150 МВт.

- ?
1. Які бувають турбіни? За якою ознакою їх поділяють?
 2. Що є основним елементом турбіни?
 3. Що покладено в основу дії парової турбіни?
 4. У чому полягає конструктивна відмінність парової і газової турбін?
 5. Де використовують парові і газові турбіни?

§ 20. ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Одним із найпоширеніших видів теплової машини є *двигун внутрішнього згоряння* (ДВЗ), який нині широко використовується в різних транспортних засобах, зокрема в автомобілях.

Розглянемо принцип дії чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння (мал. 1.24). Основним його елементом є циліндр із

Розрізняють карбюраторні ДВЗ і дизельні (названі на честь їх винахідника, німецького інженера Р. Дизеля)



Мал. 1.24. Схема роботи чотиритактного ДВЗ

поршнем, усередині якого відбувається згоряння палива (звідси походить назва двигуна). Як правило, їх кілька. Тому кажуть про дво-, чотири- чи восьмициліндрові двигуни тощо.

Циліндр має два отвори з клапанами — впускним і випускним. Робота ДВЗ ґрунтується на чотирьох послідовних процесах — тактах, які весь час повторюються. *Перший такт* — це впуск пальної суміші, що здійснюється через впускний клапан, коли поршень рухається вниз. Після того, як поршень досягне нижньої точки, всмоктування палива припиняється і обидва клапани закриваються. Під час *другого такту*, коли поршень рухається вгору, відбувається стиснення суміші, внаслідок чого її температура підвищується. У верхній точці поршня суміш запалюється іскрою від електричної свічки (у карбюраторних двигунах) або від високої температури сильно стиснутого газу (в дизельних двигунах). Суміш спалахує, внаслідок значного нагрівання розширюється й тисне на поршень. Сила тиску штовхає поршень донизу, відбувається *третій такт* — робочий хід, під час якого виконується робота. За допомогою шатунного механізму рух поршня передається колінчатому валу, який з'єднано з колесами автомобіля. Виконуючи роботу, суміш розширюється й одночасно охолоджується. Після проходження поршнем нижньої точки відкривається випускний клапан і під час руху поршня вгору відбувається *четвертий такт* — випуск відпрацьованих газів. Таким чином, робочий цикл чотиритактного двигуна завершується, і згодом все починається з першого такту.

Оскільки з чотирьох тактів ДВЗ лише один — робочий, двигун має інерційний механізм — маховик. Він запасає енергію,

I такт — впуск пальної суміші

II такт — стиснення суміші

III такт — робочий хід

IV такт — випуск відпрацьованих газів

за рахунок якої колінчастий вал обертається під час виконання решти тактів.

- ?**
1. Які існують види двигунів внутрішнього згоряння?
 2. Назвіть процеси, що відбуваються в чотиритактному ДВЗ?

! ГОЛОВНЕ В РОЗДІЛІ 1

Перебіг теплових явищ і процесів, що мають місце у природі, відбувається за певними законами, які людство пізнавало протягом своєї багатовікової історії.

1. Тепловий стан тіл визначає температура, яка характеризує середню кінетичну енергію хаотичного руху мікрочастинок тіла (атомів, молекул, електронів тощо). Температуру тіл вимірюють за допомогою термометрів, що мають різну будову і можуть бути проградуйовані за різними шкалами. Часто використовують шкалу Цельсія, за якою 0°C відповідає температурі танення льоду, а 100°C — температурі кипіння води за нормального атмосферного тиску. Одиницею температури в СІ є кельвін (позначається К), що за розміром дорівнює градусу Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).
2. Плин теплових процесів у природі завжди відбувається таким чином, що більш нагріті тіла віддають теплоту менш нагрітим і з часом їхні температури вирівнюються.
3. Внутрішня енергія тіла зумовлена тепловим рухом і взаємодією мікрочастинок речовини (атомів, молекул, електронів тощо), з яких воно складається. Внутрішня енергія може бути змінена двома способами — за рахунок виконання роботи чи внаслідок теплообміну (теплопередачі). У природі існує три види теплообміну — теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.
4. Наслідком теплообміну може бути підвищення чи пониження температури тіла, зміна агрегатного стану речовини або виконання роботи.
5. Теплові процеси характеризуються кількістю теплоти, переданою тілу або відібраною у нього. Кількість теплоти, передана тілу, визначається його теплоємністю і зміною температур: $Q = C\Delta t$.

Теплоємність тіла залежить від питомої теплоємності речовини і маси тіла: $C = cm$. Звідси $Q = cm\Delta t$.

6. Плавлення, сублімація і кристалізація твердих тіл, випаровування рідин і конденсація газів — теплові процеси, що супроводжують зміну агрегатного стану речовини. Вони відбуваються внаслідок теплообміну шляхом передавання або відбирання певної кількості теплоти. Так, під час плавлення чи кристалізації твердого тіла, які відбуваються при сталій температурі, кількість теплоти дорівнює $Q_{\text{пл}} = Lm$. У разі випаровування рідини чи конденсації пари $Q_{\text{п}} = rm$.
7. У теплообмінних процесах справджується умова теплового балансу: сума кількості теплоти, яку отримали тіла внаслідок теплообміну, дорівнює сумі кількості теплоти, яку віддали інші тіла.
8. Кількість теплоти, яку отримують під час згоряння палива, залежить від виду палива і його маси: $Q = qm$. Речовини мають різну теплотворну здатність.
9. У теплових машинах (паровій і газовій турбіні, двигунах внутрішнього згоряння тощо) відбувається перетворення теплової енергії в механічну. Закон збереження енергії, як основоположний закон природи, заперечує можливість створення вічного двигуна, оскільки в природі неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплоти.
10. Тверді тіла бувають кристалічними (для них характерні сталі температури плавлення і кристалізації) та аморфними (вони не мають сталих температур плавлення і твердіння).
11. Для створення теплової машини необхідно мати: нагрівник, який віддає певну кількість теплоти робочому тілу; робоче тіло, яке виконує роботу за рахунок частини одержаної від нагрівника теплоти; охолоджувач, якому робоче тіло віддає частину теплоти, одержаної від нагрівника.
12. Коефіцієнт корисної дії теплової машини завжди менший одиниці.

ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА

§ 21. СВІТ ЕЛЕКТРИКИ
(замість вступу)

Широкого використання електричні явища набули фактично лише у ХІХ ст. завдяки дослідженням всесвітньо відомих учених. Це, перш за все, Шарль Кулон, Луїджі Гальвані, Алессандро Вольта, Андре Ампер, Ганс Ерстед, Георг Ом, Майкл Фарадей, Джеймс Максвелл, Генріх Герц, Олександр Попов та багато інших.

Щоб краще уявити значення електрики в нашому житті, подумайте, що могло б статися, якби вона раптом зникла. Відразу замовкнуть радіоприймачі й телефони, зникнуть зображення з екранів телевізорів та комп'ютерів, зупиняться верстатки на заводах і фабриках, які приводяться в рух за допомогою електричних двигунів... Навіть звичний автомобіль не зможе рухатися, бо не працюватиме його стартер, за допомогою якого якого запускається двигун, система запалення, освітлення, контролю... Раптове зникнення електрики в сучасному світі спричинило б величезну катастрофу.

У природі є електричні явища, що супроводжують людину все життя, — це блискавки (мал. 2.1), величезні електричні розряди, які можуть завдати багато лиха. Тому здавна їх вивчають, щоб знайти надійний захист. Грім, що супроводить блискавку, майже безпечний. Це звук, який виникає від раптового розширення повіт-

Щодня ми чуємо або вимовляємо слова «електрика», «електротехніка», «електроніка»... В основу цих галузей покладені електричні явища



Мал. 2.1. Блискавка

ря, що нагрівається під час виникнення блискавки.

Зайве говорити про те, що сталося б, якби перестала працювати сучасна електронно-обчислювальна техніка, завдяки якій здійснюється керування величезною кількістю виробничих процесів.

Вирішальна роль електричної енергії у сучасному житті пояснюється її перевагами перед іншими видами енергії.

По-перше, *електрична енергія найбільш універсальна, вона легко перетворюється в механічну, теплову, хімічну, світлову тощо.*

По-друге, *електричну енергію зручно розподіляти між найрізноманітнішими споживачами.* Навіть у вашій квартирі від однієї електромережі живляться радіоприймач і телевизор, електрична лампа і холодильник, електрична праска і магнітофон.

По-третє, *електричну енергію можна досить просто передавати на значні відстані без значних втрат.* Це дає можливість за допомогою ліній електропередачі (мал. 2.2) енергію подавати від гідравлічних електростанцій (мал. 2.3), що їх зводять на річках, чи теплових електростанцій, які можна будувати біля покладів палива.

Сьогодні і, мабуть, у найближчому майбутньому електрика залишається основою наукового і технічного прогресу суспільства.



Мал. 2.2. Лінія електропередачі



Мал. 2.3. Машинний зал гідроелектростанції

§ 22. ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ТІЛ. ДВА РОДИ ЗАРЯДІВ

У повсякденному житті ми часто можемо спостерігати електричні явища. Розчісуючи сухе волосся пластмасовим гребінцем, ви, мабуть, спостерігали дрібненькі іс-

корки і потріскування. Це і є невеликі блискавки і громи.

Якщо при цьому гребінець піднести до дрібненьких клаптиків паперу, то вони будуть притягуватися до нього. Коли скляну паличку потерти об шовк або аркуш сухого паперу, то ця паличка набуде властивості притягувати різні тіла (мал. 2.4). Так само



Мал. 2.4. Заряджені тіла притягують тіла незаряджені

поводить себе, наприклад, і ебонітова паличка, потерта об шерстяну тканину чи вовну.

Ще у VII ст. до н. е. ця особливість була виявлена у янтарю (буриштину). Грецькою мовою янтар називається електроном. Тому причину притягання тіл янтарем, який натирали шерстю, назвали електричною силою. Звідси й пішла назва цілої галузі фізики — *електрика*.

Явище, в результаті якого тіла набувають властивості притягувати інші тіла, здавна називають електризацією тіл, а самі тіла називаються наелектризованими або ж такими, що мають електричний заряд.

Під час вивчення фізики у 7-му класі ви дізнались, що всі тіла, які нас оточують, складаються з атомів, а атоми можуть об'єднуватися в молекули — «мікроцеглинки» ре-

Янтар — скам'яніла смола хвойних дерев, що росли на землі багато сотень тисяч років тому. На мал. 2.5 показаний кусок янтарю, добутого в Україні



Мал. 2.5. Янтар, хутро

чонини. До складу всіх без винятку атомів (і молекул) входять так звані елементарні частинки, що мають невід'ємні від них електричні заряди, наприклад електрони і протони: електрони мають *негативний* заряд, а протони — такий самий за значенням, але *позитивний*.

Тіла заряджаються не лише у разі натирання одних тіл іншими. Під час будь-якої взаємодії різнорідних тіл та безпосереднього контакту відбувається їх заряджання. Але при натиранні контакт між тілами щільніший і вони заряджаються сильніше, що легше виявити під час дослідів.

Усі заряджені тіла притягують до себе інші тіла, які не були зарядженими.

Деякі властивості можна виявити під час дослідження взаємодії заряджених тіл. Зарядимо натиранням об хутро ебонітову паличку і підвісимо її на нитці.

Якщо тепер піднести до неї так само заряджену іншу ебонітову паличку (мал. 2.6), то заряджені палички будуть відштовхуватися.

Якщо ж до зарядженої ебонітової палички піднести заряджену тертям об шовк чи сухий папір скляну паличку, то палички будуть притягуватись одна до одної (мал. 2.7).

З цих дослідів можна зробити висновок, що однаково заряджені тіла відштовхуються, а по-різному заряджені тіла притягуються.

Найрізноманітніші досліди показують, що заряди бувають двох видів: одні такі самі, як на ебонітовій паличці, а інші — як на скляній. Заряди, як на склі, потертому об шовк, назвали *позитивними*, а заряди, як на янтарі, потертому об хутро, — *негативними*. Позитивні заряди позначили знаком «+» (плюс), а негативні — «-» (мінус).

Тепер можна зробити такі висновки:

1) існують незаряджені та заряджені тіла або частинки, з яких вони складаються;

Ретельні дослідження показали, що під час взаємодії тіл заряджається кожне з них. При натиранні ебонітової палички хутром заряджається як паличка, так і хутро — обоє помітно притягують легенькі клптики паперу



Мал. 2.6. Відштовхування однаково заряджених паличок



Мал. 2.7. Притягування неоднаково заряджених паличок

2) одноїменно заряджені тіла або частинки відштовхуються, а різнойменно заряджені — притягуються;

3) під час взаємодії різнорідних тіл вони заряджаються різнойменно і, відповідно, притягуються одне до одного;

4) елементарні частинки, що входять до складу атомів і молекул: електрони мають негативний заряд, протони — позитивний. Існують і незаряджені елементарні частинки, наприклад нейтрони.

- ?
1. Як можна виявити, чи заряджені тіла?
 2. Звідки походить слово «електрика»?
 3. Як можна показати, що під час контакту заряджається кожне з тіл?
 4. Як взаємодіють між собою: а) дві ебонітові палички, натерті об хутро? б) дві скляні палички, натерті об шовк або сухий папір? в) ебонітова паличка, натерта об хутро, та скляна паличка, натерта об шовк чи папір?
 5. Які два види зарядів існують у природі, як їх називають і позначають?
 6. Які заряджені елементарні частинки ви знаєте? Як вони називаються і які мають заряди?

§ 23. ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ТІЛ. ПРОВІДНИКИ І НЕПРОВІДНИКИ ЕЛЕКТРИКИ

Як ви вже знаєте, заряд є невід'ємною властивістю певних елементарних частинок, які входять до складу всіх тіл, що нас оточують. Коли говорять, що тіло заряджене негативно, то це означає, що в ньому більше негативно заряджених частинок (електронів), ніж позитивно заряджених. Якщо тіло незаряджене, то в ньому кількість позитивно і негативно заряджених частинок однакова. Тобто заряди електрона і прото-

Заряд електрона негативний,
заряд протона позитивний

на мають однакові значення, але різні за знаками: заряд електрона негативний, а заряд протона позитивний.

Коли тіло заряджене позитивно, то це означає, що в ньому електронів менше, ніж протонів. Заряджання і розряджання тіл пояснюється лише переходом тих чи інших заряджених частинок від одних тіл до інших.

Під час натирання скляної палички шовком або папером вона заряджається позитивно, це означає, що з неї на шовк чи папір перейшла певна кількість електронів з негативним зарядом.

Найпростішими приладами для вивчення заряджених тіл здавна були так звані **електроскопи** (мал. 2.8). Слово електроскоп походить від грецьких слів: електрон і скопо — спостерігати, виявляти. Через пластмасову пробку в металевій оправі проходить металевий стержень, на кінці якого закріплені дві смужки тонкого паперу. Оправа з обох боків закрита склом.

Якщо провести позитивно зарядженою паличкою або іншим зарядженим тілом по кульці електроскопа, то кулька й стержень, а разом з ними й клаптики також зарядяться. Оскільки однойменно заряджені тіла відштовхуються, то смужки розійдуться на певний кут. Чим більшого заряду набуває електроскоп, тим на більший кут відхиляються смужки. Отже, спостерігаючи за змінами кута розходження смужок електроскопа, можна зробити висновок про те, збільшується чи зменшується його заряд.

На мал. 2.9 показаний електроскоп, виготовлений майже 100 років тому. За допомогою такого електроскопа вже можна було вимірювати певні електричні величини.

Часто для дослідів з електрики використовують досконаліший прилад — так званий **електрометр** (мал. 2.10). Тут легенька металева стрілочка *B*, що заряджається так



Мал. 2.8. Електроскоп



Мал. 2.9. Електроскоп, що використовувався на початку XX ст.

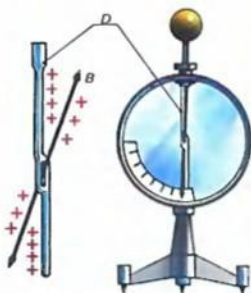
само від металеного стержня *D*, відштовхується від нього на тим більший кут, чим більше вони заряджені.

Якщо доторкнутися до кульки електроскопа рукою, то він розрядиться. Якщо він був заряджений позитивно, то при доторкуванні до кульки рукою на електроскопі із землі перейде певна кількість негативно заряджених електронів, які й скомпенсують позитивний його заряд.

Коли до електрометра чи будь-якого зарядженого тіла доторкнутися куском скла, пластмаси, сухої деревини тощо, то тіла не розрядяться. Очевидно, що в цих речовинах немає вільних заряджених частинок. Тому їх назвали *непровідниками електрики, ізоляторами, або діелектриками. Це фарфор, ебоніт, скло, гума, пластмаси, повітря, бензин тощо.*

Через тіло людини заряджені тіла розряджаються, тому воно так само є *провідником електрики*. До добрих провідників належать метали, розчини кислот, лугів, солей тощо.

Більшість речовин у природі не є провідниками. Серед величезної кількості речовин існує чимало таких, що мають дуже важливі для науки і техніки властивості, наприклад *напівпровідники*, про які ви дізнаєтеся під час подальшого вивчення фізики.



Мал. 2.10. Електрометр

Тіла, в яких є заряджені частинки, що можуть переміщатись у певному напрямку при певних діях на них, є провідниками електрики

Тіла, в яких таких заряджених частинок немає, є непровідниками електрики (ізоляторами, діелектриками)

- ?
1. Як виявити на дослідах, заряджені тіла чи ні?
 2. Як показати, що при контакті двох різнорідних тіл кожне з них заряджається?
 3. Як взаємодіють між собою одно- і різноіменно заряджені тіла?
 4. Як за допомогою клаптиків паперу виявити, чи заряджене дане тіло?
 5. Опишіть будову і дію простих електроскопів.
 6. Як виявити, що одні тіла є провідниками, а інші — непровідниками?

Заряджені тіла, як ви вже знаєте, взаємодіють одне з одним на відстані — різноманітні заряджені тіла притягуються, а однією заряджені відштовхуються. Ретельні досліди показують, що така взаємодія відбувається не лише тоді, коли між тілами є повітря або будь-яка речовина, а й коли між ними створено вакуум, наприклад відкачано повітря чи ці тіла розміщено у відкритому Космосі.

Видатні англійські вчені Фарадей і Максвелл встановили, що *у просторі навколо заряджених тіл чи частинок, існує електричне поле*. Висновки щодо існування електричного поля можна зробити, розглядаючи його дію.

Сила, з якою електричне поле діє на вислене в нього заряджене тіло чи частинку, називається електричною силою.

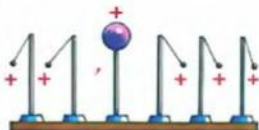
На мал. 2.11 показано, як електричне поле позитивно зарядженої кулі діє на невеличкі також позитивно заряджені кульки на різних відстанях. З цього досліду можна перекоонатися, що чим менша відстань між тілами, котрі взаємодіють, тим більша сила їхньої взаємодії.

Дослідження, які одним із перших виконав французький учений Кулон, показали, що при збільшенні відстані між зарядженими тілами у 2 рази сила їхньої взаємодії зменшується у 4 рази, при збільшенні відстані у 3 рази сила взаємодії зменшується у 9 разів і т. д. Кулон зробив висновок, що сила взаємодії заряджених тіл чи частинок F обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F \sim \frac{1}{r^2},$$

де r — відстань між зарядженими тілами, розмірами яких можна знехтувати порівняно з цією відстанню.

Електричне поле зарядженого тіла (чи частинки) діє з певною силою на різноманітні заряджені тіла (чи частинки), що перебувають у цьому електричному полі



Мал. 2.11. Взаємодія позитивно зарядженої кулі з позитивно зарядженими маленькими кульками

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

Кулон також довів, що сила взаємодії заряджених тіл прямо пропорційна значенням їхніх зарядів:

$$F \sim q_1 \cdot q_2,$$

де q_1 — заряд одного тіла, а q_2 — іншого.

Об'єднавши висновки, Кулон встановив один із найважливіших законів електрики, названий його ім'ям. Відповідно до цього закону сила взаємодії заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати, порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Математично закон Кулона можна записати так:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

де k — коефіцієнт, який залежить від вибору одиниць вимірювання заряду, про що мова йтиме далі.

Підсумовуючи викладене в цьому параграфі, можна зробити висновки:

- 1) всі заряджені тіла чи частинки мають електричні поля;
- 2) взаємодія заряджених тіл чи частинок здійснюється через їхні електричні поля;
- 3) сила взаємодії заряджених тіл чи частинок залежить від значень їхніх зарядів і відстані між ними;
- 4) електричні поля реально існують у навколишньому середовищі, як реально існують, наприклад, різноманітні речовини, молекули, атоми, елементарні частинки.



Кулон Шарль Огюстен (1736—1806) — французький фізик і інженер. Праці стосуються електрики, магнетизму, механіки. У 1785 р. дослідив силу взаємодії між зарядженими тілами і сформулював закон взаємодії, названий його ім'ям

Математично закон Кулона можна записати так:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

- ?
1. Чим відрізняється простір навколо заряджених тіл від простору навколо тіл незаряджених?
 2. Від чого залежить електрична сила взаємодії заряджених тіл?
 3. Які особливості взаємодії заряджених тіл встановив Кулон?

За дослідами можна встановити, що під час взаємодії заряджених чи заряджених і незаряджених тіл їхні заряди можуть змінюватись, хоча сумарний заряд взаємодіючих тіл залишається сталим.

Проведемо дослід. Зарядимо один з електроскопів (електрометрів), наприклад, позитивно, а інший залишимо незарядженим (мал. 2.12). Відмітимо покази стрілки зарядженого електрометра.

Тепер з'єднаємо кульки обох електрометрів металевим провідником *A*, закріпленим на ручці *B* з діелектрика (ізолятора). При цьому заряджені частинки між електрометрами перерозподіляться (мал. 2.13). Заряд першого електрометра зменшиться, а заряд другого збільшиться. Перший електрометр частково розрядиться, а другий зарядиться.

Якщо електрометри однакові, то можна зробити висновок, що *початковий заряд поділився на дві рівні частини*.

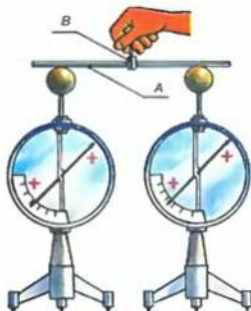
Тепер роз'єднаємо електрометри — вони залишаться зарядженими. Доторкнувшись пальцем до другого електрометра, розрядимо його. З'єднаємо знову заряджений електрометр з незарядженим — знову заряд поділиться на дві рівні частини. Так можна й далі поділяти заряджені частинки між електрометрами на більш дрібні.

Але виникає питання: чи довго можна так перезаряджати електрометри або інші заряджені тіла? Щоб відповісти на це питання, були проведені дуже складні й точні дослідження видатним американським ученим Робертом Міллікеном та А. Ф. Йоффе. Вони досліджували дію електричного поля на освітлені найдрібніші заряджені порошинки цинку, які можна було спостерігати лише в мікроскоп.

А. Ф. Йоффе встановив важливу закономірність: *заряд порошинок змінювався ли-*



Мал. 2.12. Заряджений і незаряджений електрометри



Мал. 2.13. При з'єднанні зарядженого і незарядженого електрометрів металевим провідником обидва прилади стають зарядженими

ше у ціле число разів (2, 3, 4, 5 і т. д.) від якогось найменшого його значення.

На підставі цього він зробив висновок, що в природі існує така частинка, яка має найменший відомий науці заряд і цей заряд вже не поділяється. Ви вже знаєте, що частинку назвали електроном.

За одиницю заряду визначено кулон (позначається Кл) — на честь французького вченого Шарля Кулона.

Значення заряду електрона визначив Роберт Міллікен. Він встановив, що електрон має негативний заряд — $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, який є невід'ємною його властивістю. Маса електрона дорівнює $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, що менше в 3700 разів від найменшої з усіх молекул — молекули водню H_2 .



Іоффе Абрам Федорович (1830—1960). Народився в м. Ромни. Праці стосуються фізики твердого тіла, зокрема напівпровідників, загальних питань фізики. У 1913 р. виконав роботи з вимірювання заряду електрона

- ?
1. Як показати на досліді, що заряд може поділятися?
 2. Чи може заряд поділятися нескінченно?
 - 3. Що таке електрон? Що ви знаєте про його заряд і масу?
 4. Чи можуть тіла чи частинки мати заряд у 1,5 раза більший чи менший від заряду електрона?
 5. Заряд даного тіла — $6,4 \cdot 10^{-10}$ Кл. Якій кількості електронів відповідає цей заряд?

§ 26. БУДОВА АТОМІВ

Певні відомості про атомарну будову речовини ви вже одержали під час вивчення фізики та хімії. Ще давньогрецький філософ Левкіпп (500—440 рр. до н. е.) стверджував, що матеріальний світ складається з найдрібніших частинок і порожнечі, тобто всі речовини не є суцільними. Також давньогрецький філософ Демокріт назвав найдрібніші частинки речовини атомами, що у перекладі з грецької означає «неподільні». Він вважав, що атоми різних речовин мають різні розміри, форму та властивості, неперервно рухаються. Але погляди давніх атомістів були лише здогадками, гіпотеза-



Демокріт (близько 460—370 рр. до н. е.) — давньогрецький учений, філософ, головний представник давніх атомістів. Вважав, що всі тіла складаються з найдрібніших неподільних частинок — атомів

ми, оскільки на той час не могли бути підтверджені дослідями.

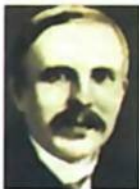
Лише в 1897—1898 рр. було встановлено, що *атоми не є неподільними, а мають складну будову*. На початку XX ст. англійський фізик Ернест Резерфорд із співробітниками провів дослід з розсіювання позитивно заряджених частинок під час їхнього проходження через дуже тонку золоту фольгу. На мал. 2.14 показано, як Резерфорд уявляв проходження через атом позитивно заряджених частинок.

Ретельний аналіз дослідів дав можливість Резерфорду зробити висновок: *у центрі атома є досить важка частинка, що має позитивний заряд, — ядро атома*. На значній відстані від ядра (порівняно з його розмірами) по певних орбітах рухаються електрони.

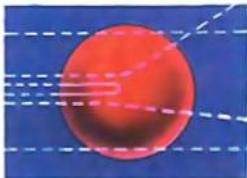
Щоб уявити, скільки «порожнього» місця в атомі, можна скористатися таким порівнянням: якщо атом збільшити так, щоб ядро мало діаметр 15...20 мм, то відстань від ядра до найближчих електронів у атомі буде дорівнювати кілометру.

Ядро виявилось зарядженим позитивно. Але у *нормальному стані атоми речовин є нейтральними*. Це означає, що сумарний заряд усіх електронів атома дорівнює заряду ядра. Запропонована Резерфордом модель атома називається *ядерною моделлю*.

Електрони в атомах рухаються навколо ядра внаслідок дії електричних сил: негативно заряджені електрони притягуються до позитивно заряджених ядер. Це дещо схоже на рух планет нашої Сонячної системи навколо Сонця. Проте природа сил тяжіння у останньому випадку зовсім інша — це так звана гравітаційна взаємодія, дія сил всесвітнього тяжіння, про що ви вже дізналися під час вивчення фізики у 7-му класі. Гравітаційні сили, на відміну від електрич-



Резерфорд Ернест (1871—1937) — англійський фізик, фундатор ядерної фізики. Його дослідження присвячені радіоактивності, атомній і ядерній фізиці



Мал. 2.14. Схема проходження позитивно заряджених частинок через атом золотої фольги

Електрони в атомах рухаються навколо ядра внаслідок дії електричних сил: негативно заряджені електрони притягуються до позитивно заряджених ядер

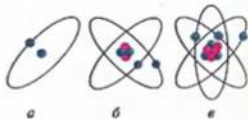
них, є лише силами притягання. Крім того, гравітаційні сили набагато слабкіші від електричних.

Атоми різних хімічних елементів відрізняються зарядом ядра, а у звичайному стані й кількістю електронів у них. Пізніше було встановлено, що ядра атомів мають складну будову: до їхнього складу входять **позитивно заряджені частинки — протони**, а також **незаряджені частинки — нейтрони**. Заряд протона за значенням дорівнює заряду електрона, але має масу в 1840 разів більшу, ніж маса електрона. Маса ж нейтрона дещо більша від маси протона.

На мал. 2.15 показані схеми будови атомів ізоотопів Гідрогену — Протію (а), Гелію (б) і Літію (в). Протони в ядрах атомів позначені кружечками, що мають знак «+».

Існують атоми, які мають однакову кількість протонів у ядрі, але **різну кількість нейтронів**. Це так звані ізоотопи. Так, наприклад, відомі три ізоотопи Гідрогену (водню): ядро атома звичайного Гідрогену складається лише з одного протона, ядро атома важкого Гідрогену — Деїтерію складається з одного протона і одного нейтрона, а ядро атома надважкого Гідрогену — Тритію — з одного протона і двох нейтронів. Ізоотопи одного і того самого хімічного елементу мають різні фізичні властивості.

Як ви вже знаєте, за звичайних умов атоми є електрично нейтральними, тобто навколо ядра обертається стільки електронів, скільки протонів міститься в ньому. Але якщо такий атом втратить один або кілька електронів, то він уже матиме надлишковий позитивний заряд (нескомпенсований заряд ядра). Такий атом уже стає **позитивним йоном (катіоном)**. Коли ж нейтральний атом приєднує зайві електрони, то він стає **негативним йоном (аніоном)**.



Мал. 2.15. Схеми будови атомів:
а — Протію, б — Гелію, в — Літію

Ізоотопи — це різновиди атомів певного хімічного елементу, що мають різну масу, яка визначається сумою мас протонів і нейтронів. Кількість нейтронів в ядрах ізоотопів одного й того самого елементу різна

Йони — це заряджені частинки (атоми чи групи хімічно зв'язаних атомів) з недостаткою електронів (катіони) або їх надлишком (аніони)

Йони можуть утворюватись і під час розпаду молекул. Так, під час розчинення молекул кухонної солі у воді частина її молекул розпадається на позитивно заряджені йони Натрію і негативно заряджені йони Хлору. При взаємодії такі йони можуть знову об'єднуватись у нейтральні молекули.

- ?
1. Чим відрізняються один від одного атоми різних хімічних елементів?
 2. Що є головною характеристикою певного хімічного елемента?
 3. Які частинки входять до складу ядер атомів?
 4. Яка будова атомів звичайного Гідрогену, Гелію та Літію?
 5. Які атоми називаються ізотопами?
 6. Як утворюються позитивно і негативно заряджені йони?

ВПРАВА 12

1. Розгляньте будову атомів Гідрогену, Гелію та Літію. За таблицею «Періодична система елементів Д. І. Менделєєва» порівняйте порядковий номер цих атомів у системі з кількістю протонів у їхніх ядрах і зробіть висновки. Чи відповідає номер хімічних елементів у таблиці кількості електронів у атомах? Як можна дізнатися про кількість нейтронів у ядрах атомів?
2. Ядро атома вуглецю складається з 12 частинок. Навколо ядра у звичайному стані рухається 6 електронів. Скільки протонів і нейтронів у ядрі цього атома?
3. Від атома Гелію відокремився один електрон. Як називається те, що утворилося з атома? Який його заряд?

§ 27. ЗАРЯДЖАННЯ ТІЛ І БУДОВА АТОМІВ

Усі тіла складаються з атомів, до складу яких входять позитивно заряджені частинки — протони (у складі ядра) та негативно заряджені частинки — електрони. За звичайних умов кількість протонів і електронів у

тілі однакова, тому сумарний заряд таких тіл дорівнює нулю.

У тілах, які називають провідниками, є певна кількість вільних заряджених частинок, що хаотично рухаються в тілі, хоча воно залишається незарядженим.

Добрими провідниками електрики є, наприклад, метали. Кристалічні ґратки металів утворюють позитивно заряджені йони, між якими хаотично рухаються електрони.

З цього можна зробити важливий висновок: тіло заряджене негативно тоді, коли воно має надлишкову, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.

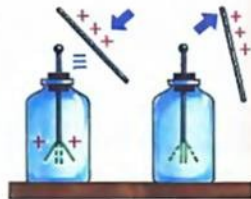
Якщо тіло втрачає електрони, то воно буде заряджене позитивно: на ньому залишиться частково некомпенсований позитивний заряд ядер атомів. Тіло заряджається позитивно, коли воно має меншу, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.

Чому ж діелектрики практично не проводять електричного струму? В діелектриках електрони міцно зв'язані зі своїми атомами і не можуть вільно рухатися по всьому тілу. У добрих провідниках (металах) частина електронів, що перебуває на найбільших відстанях від ядер своїх атомів, слабо зв'язана з ядрами, може втрачати з ними зв'язок і майже вільно рухатися в тілі провідника. Такі електрони називаються *вільними*. За певних умов вони й утворюють струм.

Розглянемо кілька прикладів зарядження тіл і появлення їх. Якщо до незарядженого електроскопа піднести позитивно заряджену паличку, то смужки паперу розійдуться на певний кут (мал. 2.16), хоч до кульки паличкою і не доторкувалися. Що ж при цьому відбувається?

Кулька і стержень електроскопа виготовлені з металу, тобто доброго провідника, зі значною кількістю вільних електронів. Під дією електричного поля, яке є навколо за-

Коли ебонітову паличку потерти об хутро, то вона зарядиться негативно, а хутро — позитивно. Вочевидь, що внаслідок взаємодії палички і хутра на паличці з'явиться надлишок електронів, а хутро втратить таку саму кількість електронів. Зрозуміло, що заряди палички і хутра після взаємодії однакові за значенням, але різні за знаками



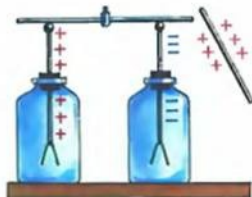
Мал. 2.16. Перерозподіл заряджених частинок в електроскопі під дією електричного поля

ридженої палички, вільні електрони частково змістяться до верхньої частини стержня. Тут виявляться надлишок електронів, а в нижній частині стержня залишиться некомпенсованим позитивний заряд. Смужки будуть заряджені позитивно і розійдуться на певний кут. Якщо паличку відвести від електроскопа, то електрони притягнуться до позитивно заряджених іонів металу і електроскоп знову буде незарядженим.

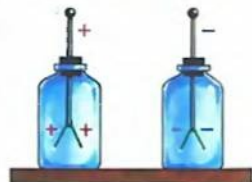
Якщо ж до кульки електроскопа піднести негативно заряджене тіло (також не доторкуючись до неї), то вільні електрони, що є в куллі і стержні, відштовхуючись від негативно зарядженого тіла, переважно зберуться в нижній частині стержня. Негативно заряджені смужки також розійдуться на певний кут. Коли віддалити заряджене тіло від електроскопа, то він знову виявиться незарядженим. Поясніть, які явища відбуваються у цьому випадку.

Таке заряджання тіл чи їхніх частин називають **електризацією через вплив**. При електризації через вплив заряджені частинки можна розділити, що доведено на досліді (мал. 2.17). З'єднаємо два однакові електроскопи металевим провідником з ізоляційною ручкою і піднесемо до одного з електроскопів позитивно заряджене тіло (мал. 2.17, а). Смужки паперу на обох електроскопах розійдуться на певний кут. Чому?

Частина вільних електронів, що є у стержнях електроскопів і провіднику, яким їх з'єднано, під дією електричного поля позитивно зарядженого тіла перейде на правий електроскоп, де й виявляться їх надлишок. Цей електроскоп буде мати негативний заряд, а лівий, відповідно, — позитивний. Якщо позитивно заряджене тіло віддалити від електроскопів, то вони знову стануть незарядженими.



а



б

Мал. 2.17. Заряджання різноіменно двох електроскопів

Якщо спочатку прийняти від електроскопів металевий провідник, що їх з'єднує, а потім заряджене тіло, то обидва електроскопи виявляться зарядженими (мал. 2.17, б). Як можна показати, що заряди на них різнойменні? Якщо тепер з'єднати обидва електроскопи металевим провідником на ізолюючій ручці, то вони повністю розрядяться.

- ?
1. Поясніть заряджання тіл під час їхнього контакту (наприклад натирання).
 - 2. Чому при заряджанні тіл під час їхнього контакту обидва тіла мають однакові за значенням, але протилежні за знаком заряди?
 3. Що таке електризація через вплив?

ВПРАВА 13

1. Чому можна зарядити паличку з діелектрика під час тертя, тримаючи її в руці, і зовсім неможливо це зробити з металевою паличкою?
2. Щоб з'єднати пошкоджені провідники, електромонтер надіває гумові рукавиці й використовує інструменти з ізольованими ручками. Для чого він це робить?
3. У наявності три однакові металеві кулі на ізолюючих підставках. Одна з куль заряджена. Як зарядити різнойменно дві інші кулі? Поясніть свої дії.

§ 28. ЩО ТАКЕ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ?

Сьогодні важко уявити собі життя без широкого використання електричного струму. Він живить радіоприймачі та телевізори, комп'ютери і двигуни електропотягів, допомагає готувати їжу і лікує певні хвороби тощо. Що ж таке електричний струм?

Важко знаєте, що до складу атомів, з яких складаються тіла, входять заряджені частинки: протони (позитивно заряджені) та електрони (негативно заряджені). Проте за звичайних умов у куску металу електричний струм не спостерігається. А як його можна виявити?

При існуванні різних видів електричного струму для них є спільною так звана магнітна дія. Відомий датський учений Ганс-Христіан Ерстед у 1820 р. виконав виключно важливий дослід, який пізніше став основою для багатьох технічних пристроїв (мал. 2.18).

Над магнітною стрілкою, наприклад компаса, розміщений провідник, до якого може бути приєднаний гальванічний елемент, що ним користуються для одержання струму. У разі вмикання струму магнітна стрілка відхиляється — спостерігається магнітна дія струму. Саме наявність магнітної дії і є тією властивістю, що дає можливість говорити про наявність електричного струму. Дослідження показали, що струм створюють рухомі заряджені частинки або тіла.

Як бачимо з досліду Ерстеда, у металевому провіднику струм виник тоді, коли до нього приєднали гальванічний елемент — джерело електричного струму. Поясніть, які заряджені частинки могли рухатися у металевому провіднику?

Металеві провідники, як ви вже знаєте, має кристалічні ґратки, що утворюються з атомів і позитивно заряджених йонів. Між цими йонами хаотично рухаються «вільні» електрони (мал. 2.19). Коли до такого провідника приєднати джерело струму, то на заряджені частинки металу будуть діяти електричні сили: в одному напрямку на позитивно заряджені частинки, а у протилежному — на негативно заряджені. Але йони кристалічних ґраток у металі вільно руха-



Ерстед Ганс-Христіан (1777—1851) — датський фізик. Праці з електрики, акустики, молекулярної фізики. У 1820 р. виявив дію електричного струму на магнітну стрілку, що сприяло виникненню галузі фізики — електромагнетизму



Мал. 2.18. Дослід Ерстеда

тися не можуть. Подумайте, як будуть рухатися вільні електрони?

Зазвичай, хаотичний рух вільних електронів не припиняється, але всі вони ще будуть рухатися у певному напрямку під дією електричного поля, як рій мошок чи бджіл, що переміщується у певному напрямку під дією вітру.

Саме цей напрямлений рух вільних електронів у металі і є струмом. Розглянутий струм називають **струмом провідності**.

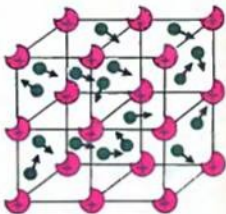
Проте таке напрямлене переміщення електронів у провіднику можна одержати й у інший спосіб.

Уявіть собі, що металевий стержень падає на землю (на підлогу) вертикально. Ударившись об підлогу, стержень зупиниться — зупиняться жорсткі кристалічні ґратки. А щодо вільних електронів, то вони ще будуть певний час продовжувати свій рух до землі. Цим пояснюється виникнення **інерційного електричного струму**.

В обох розглянутих випадках струм утворюється хаотичним рухом величезної кількості електронів. На цей рух накладається напрямлене переміщення електронів, що може виникати за різних причин.

Але струм можуть створювати й великі заряджені тіла, що рухаються у певному напрямку. Якщо тіло, яке навіть має значні розміри, має електричний заряд і рухається у певному напрямку, то при цьому виникає магнітне поле, що свідчить про наявність електричного струму. Це так званий **конвекційний струм**.

Отже, електричним струмом називається напрямлений рух заряджених частинок або заряджених тіл.



Мал. 2.19. Булова металу

Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок або заряджених тіл

- ?
1. Що таке електричний струм?
 2. Як можна отримати струм у металевому провіднику?
 - 3. Яка дія струму підтверджує, що він існує?
 4. Який дослід провів Ерстед і які з цього були зроблені висновки?

У багатьох випадках електричний струм слід підтримувати протягом тривалого часу, наприклад, для кімнатного освітлення, під час плавлення металу в електропечах, для роботи електротранспорту тощо. Для цього необхідні джерела струму.

У будь-якому джерелі електричного струму відбувається роз'єднання заряджених частинок, які в ньому є, за рахунок виконання роботи так званими сторонніми силами. Такі сили не можуть мати електростатичного походження.

Якщо обертати рамку з певною кількістю витків ізоляованого провідника в магнітному полі, то при цьому виконується механічна робота, полюси генератора заряджаються різноіменно, в лампі виникає струм і вона світиться (мал. 2.20). Так само працюють генератори на великих електростанціях.

У гальванічних елементах (мал. 2.21) в розчин певних речовин, наприклад кислот, опускають дві пластинки з різних речовин, що по-різному взаємодіють з розчином. Унаслідок хімічних реакцій ці пластинки (електроди) заряджаються різноіменно і можуть створювати струм протягом тривалого часу.

В акумуляторі (акумуляре — нагромаджувати) (мал. 2.22) у розчин, наприклад сульфатної кислоти, опускають два однакові електроди. Але такий акумулятор струму не дає. Його попередньо потрібно зарядити, пропускаючи через розчин струм певного напрямку. При цьому на електродах відбуваються різні хімічні реакції і через це вони будуть мати вже різні властивості. Тепер акумулятор працюватиме як звичайний гальванічний елемент.



Мал. 2.20. Генератор



Мал. 2.21. Гальванічний елемент



Мал. 2.22. Акумулятори

Акумулятори можуть давати струм значної сили і використовуватися багато разів.

Одержати електричне джерело можна й за рахунок нагрівання певних речовин — це так звані термоелементи (мал. 2.23). Якщо з'єднати два різні провідники і нагріти одне із з'єднань так, щоб ці з'єднання мали різну температуру, то одержимо струм. Особливо ефективним у термоелементах є поєднання металевих провідників і напівпровідників (мал. 2.24).

Широко використовуються напівпровідникові перетворювачі енергії світла в електричну енергію — фотоелементи, сонячні батареї (мал. 2.25).

Отже, в джерелах струму за рахунок сил неелектричного походження відбувається розподіл заряджених частинок, через що електроди джерел струму заряджаються різноіменно.



Мал. 2.23. Термоелемент



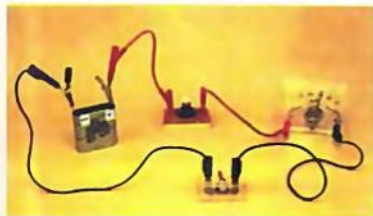
Мал. 2.25. Сонячна батарея супутника



Мал. 2.24. Термоелемент напівпровідниковий

- ?
- 1. Для чого необхідні джерела струму?
 - 2. Що відбувається в джерелах струму?
 - 3. Які джерела струму ви знаєте?
 - 4. Чим відрізняється акумулятор від гальванічного елемента?

Для практичного використання електричного струму потрібні джерело струму, його споживачі, провідники, за допомогою яких струм передається від джерела до споживача. Для вмикання струму користуються вимикачами, а для запобігання пошкодженню приладів — запобіжниками. На мал. 2.26 усі прилади увімкнені так, що



Мал. 2.26. Електричне коло

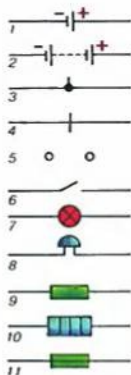
лампа як споживач світиться за рахунок енергії джерела струму — батареї гальванічних елементів. Усі складові частини з'єднані у замкнене коло. Тому такі установки називають електричними колами.

У найпростіших випадках до складу електричних кіл входять: 1) джерело струму; 2) системи з'єднувальних провідників і керуючих пристроїв; 3) споживачі електричної енергії.

Для вимірювання фізичних величин, що характеризують електричний струм, у коло вмикають різноманітні прилади — амперметри, вольтметри, лічильники електричної енергії тощо.

У замкнених електричних колах розрізняють їх внутрішню частину (власне дже-

Складові частини найпростішого електричного кола: джерело струму; системи з'єднувальних провідників і керуючих пристроїв; споживачі електричної енергії

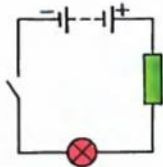


Мал. 2.27. Умовні позначення складових частин електричних кіл:

1 — гальванічний елемент чи акумулятор; 2 — батарея гальванічних елементів чи акумуляторів; 3 — з'єднані провідники; 4 — провідники, які не з'єднані електрично; 5 — клеми; 6 — вимикач чи ключ; 7 — електрична лампа; 8 — дзвінок; 9 — резистор; 10 — нагрівник; 11 — запобіжник

рело струму) і зовнішню (все те, що приєднується до полюсів джерела струму).

Електричні кола зображують за допомогою електричних схем, де складові частини кола показують, використовуючи умовні позначення. Деякі з умовних позначень наведені на мал. 2.27. А на мал. 2.28 показана схема електричного кола, що складається з батареї, лампи, провідника-нагрівника, вимикача.

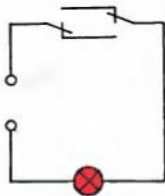


Мал. 2.28. Схема електричного кола

- ?
1. Які джерела електричного струму ви знаєте? Яке їхнє призначення?
 - 2. Які споживачі електричної енергії ви знаєте? Які з них є у вас удома?
 3. Які основні складові частини електричного кола?

ВПРАВА 14

1. Розгляньте складові частини кишенькового ліхтарика і накресліть схему їхнього вмикання.
2. Розгляньте схему електричного кола, наведену на малюнку. Де можна використати таке з'єднання?
3. Розробіть схему електричного кола з одним джерелом струму, двома вимикачами (кнопками) та одним електричним дзвінком, який можна було б умикати у двох різних місцях.



§ 31. ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Як ви дізнались, струм має магнітну дію, а про його теплову дію ви знаєте з повсякденного життя (електричний паяльник, електроплита, праска, лампа розжарювання та багато інших приладів).



Мал. 2.29. Теплова і магнітна дії струму

У багатьох випадках дії струму можуть виявлятися одночасно. На мал. 2.29 показана установка, де струм проходить по прямому провіднику, на якому підвішені клаптики паперу, та по котушці зі сталевим осердям. При вмиканні електричного струму клаптики паперу починають диміти і згорають, а котушка з осердям притягує залізні предмети. Коли струм вимкнути, то провідник охолоне, стане коротшим і підніметься до попереднього положення, а від осердя котушки залізні предмети відпадуть.

Хімічну дію струму можна легко спостерігати на досліді. У розчин сульфату купруму(II) (CuSO_4) занурюємо два однакові вугільні електроди і пропускаємо у такому колі електричний струм. При цьому на одному з електродів через певний час з'явиться помітний шар міді (мал. 2.30), інтенсивність забарвлення розчину стане меншою, а на іншому мідь не виділиться.

Дослід Ерстеда нас уже переконав, що провідник зі струмом діє на магнітну стрілку (постійний магніт). Але можна спостерігати і дію постійного магніту на кільце зі струмом (мал. 2.31). При вмиканні струму котушка притягується до магніту, або ж відштовхується від нього. Все зале-



Мал. 2.30. Хімічна дія струму



Мал. 2.31. Дія постійного магніту на кільце зі струмом

життя від того, якими полюсами до електричного кола приєднується джерело струму.

Рамка з провідника зі струмом у магнітному полі повертається на певний кут у певному напрямі. Якщо ж поміняти місцями полюси джерела струму, то рамка буде повертатися у протилежному напрямі. На цьому ґрунтується дія гальванометрів — приладів для виявлення електричного струму (мал. 2.32). Стрілка такого гальванометра з'єднана з котушкою, вміщеною в магнітне поле магніту. Вона й показує наявність струму в колі.

Повертання рамки в магнітному полі (механічна дія струму) покладено в основу дії електричних двигунів, електровимірювальних приладів.

Світлову дію струму можна спостерігати на прикладі блискавки, свічення ламп денного світла, полярного сяйва.

Електричний струм має також фізіологічну дію, тобто впливає на живі організми, і в багатьох випадках буває дуже небезпечним. Тому під час використання електричного струму слід обов'язково дотримуватися правил техніки безпеки.



Мал. 2.32. Вимірювальний механізм гальванометра

Основою дії електричних двигунів та електровимірювальних приладів є повертання рамки в магнітному полі (механічна дія струму)

- ?
1. Наведіть приклади теплової дії струму, які вам відомі.
 2. Де можна спостерігати хімічну дію струму?
 3. У чому проявляється магнітна дія струму? Де це явище може бути використане?
 4. Які ще дії струму ви знаєте?

§ 32. ПРИРОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ. НАПРЯМ СТРУМУ

Ви вже знаєте, що метали у твердому стані мають кристалічну будову. Позитивно заряджені йони утворюють кристалічні просторові ґратки, а в просторі між ними

хаотично рухаються електрони, що втрапили зв'язок зі своїми атомами, так звані вільні електрони.

Якщо до металевого провідника приєднати полюси джерела струму, то в ньому виникне електричне поле. Внаслідок цього вільні електрони, крім хаотичного, ще матимуть і рух у певному напрямі — це і є електричний струм провідності в металах. Про це мова вже йшла раніше.

Швидкість напрямленого руху вільних електронів дуже мала порівняно зі швидкістю їхнього хаотичного руху — всього кілька міліметрів за секунду, проте електричне поле у провіднику поширюється зі швидкістю близько 300 000 км/с і практично всі вільні електрони майже одночасно починають рухатися у певному напрямі. Тому на практиці вважається, що струм виникає в усіх точках електричного кола одночасно. Ми просто не помічаємо, що електричне поле в провіднику виникає не одночасно, а поширюється від точки до точки, що правда, з надзвичайно великою швидкістю, яка дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі і є найбільшою, що відома науці.

Якщо в металах електричний струм створюють вільні електрони, то в розчинах кислот, лугів, солей — йони, як позитивно, так і негативно заряджені. Під дією електричного поля позитивно заряджені частинки рухаються в одному напрямку, а негативно заряджені — у протилежному. В газах струм утворюють рухомі йони обох знаків, а також електрони.

У багатьох випадках ми говоримо не про напрям руху заряджених частинок, а про напрям струму. То який же він, цей напрям?

Цілком умовно та історично склалося так, що за напрям струму взяли той напрям, у якому рухаються (або могли б рухатися)

У звичайному стані, коли метал незаряджений, сумарний негативний заряд усіх вільних електронів за значенням дорівнює сумарному заряду всіх позитивно заряджених йонів. Незаряджений провідник називають електрично нейтральним

Під дією електричного поля позитивно заряджені частинки рухаються в одному напрямі, а негативно заряджені — у протилежному

У багатьох випадках ми говоримо не про напрям руху заряджених частинок, а про напрям струму

позитивно заряджені частинки, тобто напрям від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого.

Цим правилом і користуються в сучасній науці й техніці.

- ?
1. Як пояснити, що за звичайних умов метал електрично нейтральний (незаряджений), хоч до його складу входять і заряджені частинки?
 2. Як змінюється характер руху вільних електронів у металі, коли в ньому виникає електричне поле?
 3. Яка природа електричного струму в металі?
 4. Що мають на увазі, коли говорять про швидкість поширення струму в провіднику?
 5. Напрямок руху яких заряджених частинок взято за напрям струму?
 6. Як напрям струму пов'язаний із зарядами полюсів джерела струму?

§ 33. СИЛА СТРУМУ ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

Дія електричного струму в різних випадках може бути сильнішою чи слабкішою. Дослідження показали, що результат дії струму залежить від заряду, який переносять заряджені частинки в електричному колі за певний час.

Силою струму називається величина, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника. Силу струму позначають I .

Якщо за час t через поперечний переріз провідника переноситься сумарний заряд q , то сила струму дорівнюватиме:

$$I = \frac{q}{t}$$

На Міжнародній конференції з мір та ваги у 1948 р. було вирішено в основу одиниці сили струму покласти явище магнітної взаємодії двох провідників зі струмом.

Одиниця сили струму (ампер) =

$$= \frac{\text{одиниця заряду (кулон)}}{\text{одиниця часу (секунда)}}$$

$$1\text{ A} = \frac{1\text{ Кл}}{1\text{ с}}$$

Виконаємо дослід (мал. 2.33). Так, нізменно два гнучкі провідники, які приєднані до джерела струму, і розмістимо їх паралельно один до одного.

Якщо пропустити струм по провідниках в одному напрямі (мал. 2.33, а), то провідники притягуватимуться один до одного, а якщо у протилежних напрямках (мал. 2.33, б), то відштовхуватимуться.

Вимірювання сили взаємодії провідників показують, що вона залежить від довжини провідників, відстані між ними, середовища, в якому вони розміщені, та від сили струму в цих провідниках.

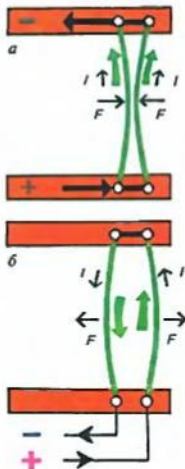
За всіх однакових умов чим більша сила струму в кожному провіднику, тим з більшою силою вони притягуються або відштовхуються (взаємодіють між собою).

Уявімо два дуже тонкі і дуже довгі паралельні провідники, розташовані у вакуумі на віддалі 1 м один від одного. Сила струму в провідниках однакова. За одиницю сили струму беруть силу струму, при якій відрізки таких двох паралельних провідників завдовжки 1 м взаємодіють із силою $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Цю одиницю на честь французького фізика і математика Ампера Андре-Марі називають ампером і позначають літерою А.

Саме через одиницю сили струму позначають одиницю електричного заряду — кулон (Кл).

Оскільки $I = \frac{q}{t}$, то $q = It$. Якщо взяти $I = 1$ А, $t = 1$ с, то отримаємо одиницю заряду — кулон.

Кулон дорівнює електричному заряду, що переноситься зарядженими частинками, які створюють струм 1 А, через поперечний переріз провідника за 1 с. Електричний заряд має ще назву кількість електрики.



Мал. 2.33. Магнітна взаємодія провідників зі струмом

Під час вимірювань застосовують також частинні або кратні одиниці сили струму:

мікроампер (1 мкА = 0,000001 А),

міліампер (1 мА = 0,001 А),

кілоампер (1 кА = 1000 А)

1 кулон = 1 ампер · 1 секунда
або 1 Кл = 1 А · 1 с = 1 А · с

Приклад. Робоча сила струму лампи для кишенькового ліхтарика 150 мА, а ви витрачаєте на дорогу від школи додому ще-чері 15 хв. Який заряд проходить через спі-раль лампи за цей час?

Дано:

$$I = 150 \text{ мА} = 0,150 \text{ А}$$

$$t = 15 \text{ хв} = 900 \text{ с}$$

$q = ?$

Розв'язання:

$$I = \frac{q}{t}, q = It$$

$$q = 0,150 \text{ А} \cdot 900 \text{ с} = 135 \text{ Кл.}$$

Відповідь. $q = 135 \text{ Кл.}$

Вимірювання сили струму

Для вимірювання сили струму розробле-но значну кількість різноманітних приладів (амперметри, міліамперметри, мікроампер-метри тощо). Ми вже розглядали будову гальванометра, де використано дію магніт-ного поля постійного магніту на рамку із струмом (прилади такої конструкції назива-ються магнітоелектричними). Гальвано-метри використовують для вимірювання малої сили струму.

На мал. 2.34 показано амперметр. Цей прилад виїнято з корпусу, щоб можна було побачити його будову та всі необхідні по-значення на шкалі.

Якщо з вимірюванням електричних вели-чин ви зустрічаєтесь уперше, то розгляне-мо, як слід це робити. Рациональною є така послідовність:

1. Установити, для вимірювання якої фізичної величини використовується даний прилад.

На шкалі приладу є літера А, яка оз-начає, що це амперметр — прилад для ви-мірювання сили струму.

2. Установити, на яке максимальне зна-чення вимірюваної величини розраховано прилад.

Оскільки біля літери А немає ніяких по-значень, то прилад розраховано на макси-



Ампер Андре-Марі (1775—1836) — фран-цузький фізик, математик, хімік. Ос-новні праці присвячені вивченню елек-тромагнітних явищ. У 1820 р. сформу-лював правило для встановлення на-пряму дії магнітного поля струму на магнітну стрілку



Мал. 2.34. Амперметр

маліше значення сили струму 20 А. Це значення сили струму не слід перевищувати, щоб не зіпсувати прилад.

3. Встановити, для якого струму (постійного чи змінного) можна використовувати прилад.

Досі ми розглядали лише постійний струм — такий струм, що не змінює свого напрямку. Постійний струм на шкалі приладу позначається горизонтальною рискою. Змінний струм позначається «~» (про такий струм ви дізнаєтесь під час подальшого вивчення фізики). Отже, даний прилад можна використовувати лише у колах постійного струму.

4. Визначити ціну поділки шкали приладу.

Ціну поділки найраціональніше визначати так. Наприклад, стрілка зупинилася між двома позначками шкали: 15 і 20 А. Тепер підрахуємо, скільки є проміжків між позначками на шкалі — їх тут 10. Ціна поділки шкали в інтервалі від 15 до 20 А:

$$\frac{20 \text{ А} - 15 \text{ А}}{10 \text{ под.}} = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}}$$

Якщо ціна поділки шкали у всіх її ділянках однакова, що має місце у розглянутому нами випадку, то таку ціну поділки можна визначити за максимальним значенням вимірюваної величини (20 А) і повним числом поділок на шкалі (40):

$$\frac{20 \text{ А}}{40 \text{ под.}} = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}}$$

5. Визначити, яке значення вимірюваної величини показує прилад.

Стрілка приладу зупинилася на дві поділки далі від 15 А. Тому прилад показує силу струму:

$$I = 15 \text{ А} + 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}} \cdot 2 \text{ под.} = 15 \text{ А} + 1 \text{ А} = 16 \text{ А.}$$

Постійний струм на шкалі приладу позначається горизонтальною рискою «—», а змінний — «~»

Є багато приладів, у яких ціна поділки шкали у різних її ділянках різна

У фізиці, де абсолютно точні вимірювання практично не зустрічаються, існують методи визначення похибок вимірювань. Про них ви дізнаєтесь пізніше

Або ж іншим способом:

$$I = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}} \cdot 32 \text{ под.} = 16 \text{ А.}$$

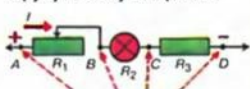
Якщо стрілка зупинилася між поділками, то значення заокруглюють до найближчої поділки.

Якщо прилад можна використовувати в колах постійного струму, то біля клем, до яких приєднуються провідники, стоять знаки «+» і «-» або лише «+» чи «-». До клем «+» слід приєднувати провідник від позитивно зарядженого полюса джерела струму, що також позначається знаком «+».

На мал. 2.35 показано електричне коло, до якого входять провідники та споживачі. Усі вони з'єднані так, що початок наступного споживача приєднується до кінця попереднього, і т. д.

Якщо амперметр увімкнути в точки *A*, *B*, *C*, *D*, то він буде показувати однакову силу струму. Пояснюється це тим, що в замкненому колі, коли немає ніяких відгалужень провідників, через будь-який поперечний переріз провідника за одиницю часу переноситься однаковий заряд.

Для вимірювання сили струму амперметр умикають у коло послідовно з тим приладом, силу струму в якому вимірюють



Мал. 2.35. Послідовне з'єднання

Заборонено приєднувати амперметри безпосередньо до джерела струму, без послідовно увімкнених з ним споживачів

- ?
1. Від чого залежить результат дії струму?
 2. Якою одиницею вимірюється сила струму?
 3. Яке явище покладено в основу встановлення одиниці сили струму?
 4. Що таке сила струму, яка дорівнює 1 А?
 5. Як визначається одиниця заряду?

ВПРАВА 15

Яку силу струму показує амперметр, що наведений на мал. 2.35? Який заряд переноситься через поперечний переріз провідників у даному колі за 1 с?

Перелік необхідних приладів для виконання лабораторних робіт:

- 1 — батарея;
- 2 — лампи;
- 3 — дріт'яний резистор;
- 4 — випрямляч;
- 5 — магазин опорів (резисторів);
- 6 — реостат;
- 7 — вимикач;
- 8 — запобіжник;
- 9 — вольтметр;
- 10 — амперметр;
- 11 — електродвигун.



Складання електричного кола та вимірювання сили струму в різних його точках

Мета: навчитися складати електричне коло, вимірювати силу струму в різних точках електричного кола.

Обладнання (див. с. 99): джерело постійного струму (1 або 4), лампа на підставці (2), дротяна спіраль на підставці (3), ключ (вимикач) (7), амперметр (10), з'єднувальні провідники.

Виконання роботи

1. Накресліть схему електричного кола з послідовно з'єднаних елементів.

2. Складіть електричне коло за накресленою схемою. Амперметр увімкніть між позитивним полюсом джерела струму і ключем.

3. Увімкніть струм, зніміть покази амперметра і запишіть значення сили струму I_1 . Вимкніть струм.

4. Амперметр увімкніть між лампою і дротяною спіраллю. Увімкніть

струм і запишіть значення сили струму I_2 .

5. Увімкніть амперметр у третю точку кола. Виміряйте силу струму I_3 .

6. Порівняйте значення сил струмів I_1 , I_2 , I_3 ; зробіть висновок і обґрунтуйте його.

За можливістю виконайте роботу без дротяної спіралі, з іншою дротяною спіраллю та іншим джерелом струму.

§ 34. ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

При проходженні електричного струму, наприклад у металевому провіднику, крім хаотичного руху вільні електрони під дією електричного поля набувають ще й певної швидкості у певному напрямі, тобто їх кінетична енергія зростає. Це означає, що електричне поле виконує роботу.

Але у разі проходження струму вільні електрони стикаються з йонами кристалічних ґраток, надаючи їм частину енергії. Йони коливаються інтенсивніше — внут-

При виникненні електричного струму в металевому провіднику вільні електрони переміщуються в певному напрямку, не припиняючи свого хаотичного руху

рішши енергія кристалічних ґраток зростає. Отже, у цьому випадку температура провідника підвищується. Ви вже знаєте, що тепла дія струму залежить від сили струму: чим більша сила струму, тим більше нагрівається провідник.

Проте не лише сила струму визначає його роботу. Проведемо такий дослід. До електричної мережі приєднаємо послідовно з'єднані лампи для кишенькового ліхтарика і для освітлення кімнати (мал. 2.36).

Відомо, що у разі такого вмикання сила струму в будь-якій точці кола однакова. Але лампа для кімнати дає, вочевидь, більше тепла і світла, ніж лампа для кишенькового ліхтарика. Тобто робота, яку виконує струм в обох лампах, неоднакова. Щоб схарактеризувати таку властивість струму, вводять фізичну величину, яка називається електричною напругою. **Напруга визначає роботу, яку виконує електричне поле при перенесенні заряду 1 Кл на даній ділянці кола (між двома його точками):**

$$U = \frac{A}{q}$$

Одиницею напруги є вольт, який позначають В.

Вольт дорівнює такій електричній напрузі на кінцях провідника (між двома точками кола), за якої робота перенесення електричного заряду в 1 Кл по цьому провіднику дорівнює 1 Дж:

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

Вимірювання напруги

Для вимірювання напруги виготовляють прилади, що називаються вольтметрами. На мал. 2.37 показаний один із вольтметрів. Послідовність дій під час вимірювання напруги (як і інших фізичних величин) така



Мал. 2.36. Послідовно з'єднані лампа для кишенькового ліхтарика та звичайна лампа для освітлення кімнати

Одиницю напруги — вольт — назвали на честь італійського вченого Алессандро Волта (1745—1827), що створив перший гальванічний елемент, поклавши початок практичним застосуванням електрики

Застосовують також частинні й кратні до вольтів одиниці: мікровольт ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$), мілівольт ($1 \text{ мВ} = 0,001 \text{ В}$), кіловольт ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$), мегавольт ($1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}$)



Мал. 2.37. Вольтметр

сама, як і під час вимірювання сили струму (див. § 34).

1. На шкалі приладу є літера V, яка означає, що це вольтметр — прилад для вимірювання напруги.

2. Біля літери V немає ніяких позначень, отже, прилад розрахований на вимірювання напруги до 3 В.

3. Оскільки на шкалі є пряма горизонтальна риска «—», то прилад можна використовувати лише в колах постійного струму.

4. Ціна поділки шкали приладу в інтервалі від 1 до 2 В:

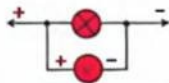
$$\frac{2 \text{ В} - 1 \text{ В}}{10 \text{ под.}} = 0,1 \frac{\text{В}}{\text{под.}}$$

5. Прилад показує напругу (із заокругленням до найближчої від стрілки риски):

$$U = 1 \text{ В} + 0,1 \frac{\text{В}}{\text{под.}} \cdot 7 \text{ под.} = 1 \text{ В} + 0,7 \text{ В} = 1,7 \text{ В.}$$

Як і в інших приладах, якщо вони можуть використовуватися у колах постійного струму, біля їх клем чи затискачів ставлять знак «плюс» («+») і мінус («—») або ж лише «+» чи «—». Ці затискачі необхідно з'єднувати з провідником, що йде до позитивного полюса джерела постійного струму або до негативного.

На відміну від амперметра, що вмикається під час розривання електричного кола для вимірювання сили струму в даній точці кола, вольтметр приєднується паралельно до ділянки кола, на якій вимірюється напруга. На мал. 2.38 показано схему вмикавання вольтметра для вимірювання напруги на лампі, а на мал. 2.39 — зовнішній вигляд такої установки, до якої входить і амперметр.



Мал. 2.38. Схема вмикання вольтметра



Мал. 2.39. Установка для вимірювання напруги на лампі та сили струму в колі

Щоб виміряти напругу на полюсах джерела струму, вольтметр приєднують безпосередньо до його затискачів, якщо ця напруга не перевищує напруги, на яку розрахований даний вольтметр

- ?
1. На якому досліді можна побачити необхідність введення поняття електричної напруги?
 2. Що таке електрична напруга та як її можна визначити?

3. Яку фізичну величину як одиницю вимірювання використовують для вимірювання напруги?
4. Для чого використовується вольтметр і як його приєднують до електричного кола?

ВПРАВА 16

1. Накресліть схему електричного кола, що складається з батареї для кишенькового ліхтаря, вимикача, лампи, вольтметра (вимірює напругу на полюсах джерела), амперметра (вимірює силу струму в лампі).



Мал. 2.40

2. На мал. 2.40 показані амперметр і вольтметр, що ввімкнені так само, як під час виконання завдання 1. Що показують ці прилади та що це означає?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Складання електричного кола та вимірювання напруги на різних його ділянках

Мета: навчитися складати електричне коло з використанням вольтметра, вимірювати напругу на різних ділянках кола, робити висновки за результатами вимірювань.

Обладнання (див. с. 99): джерело постійного струму (1 або 4), низьковольтна лампа на підставці (2), дротяна спіраль на підставці з клемми (3), вольтметр (9), з'єднувальні провідники.

Виконання роботи

1. Накресліть схему електричного кола з послідовно з'єднаних елементів.
2. Складіть електричне коло, увімкніть струм і виміряйте напругу на полюсах джерела струму. Запишіть значення цієї напруги U .
3. Виміряйте напругу U_1 на лампі та запишіть її значення.
4. Виміряйте напругу U_2 на спіралі й запишіть її значення. Вимкніть струм.
5. Порівняйте значення напруги U зі значеннями напруг U_1 та U_2 . Зробіть висновки та обґрунтуйте їх. За можливістю виконайте роботу з двома лампами, іншим джерелом струму. Зробіть висновки.

§ 35. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР. ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ ПРОВІДНИКІВ ВІД ЇХ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ТА РЕЧОВИНИ. ПИТОМИЙ ОПІР

Якщо до кількох провідників з однаковими розмірами (довжиною та площею поперечного перерізу), але з різних речовин (міді, заліза тощо) прикласти однакову напругу, то виявиться, що сила струму в них буде різною. Очевидно, що сила струму в провідниках залежить від речовини, з якої вони виготовлені. Так, наприклад, у мідному провіднику сила струму виявиться більшою, ніж у залізному. Як це можна пояснити?

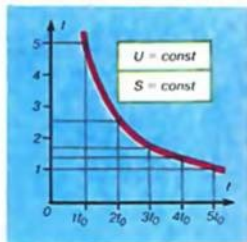
За наявності електричного струму в металевому провіднику вільні електрони, рухаючись у певному напрямі та зустрічаючись з йонами чи молекулами, віддають їм частину кінетичної енергії, набутої за рахунок джерела електричного струму. У разі таких зіткнень електрони змінюють напрям свого руху, їхній рух гальмується й відбувається нагрівання провідника. Це означає, що в провіднику створюється опір електричному струму.

Оскільки різні провідники мають різну будову та структуру, тому й чинять неоднаковий опір електричному струму.

Величина, яка характеризує протидію електричному струму в провіднику, називається опором.

Ретельні дослідні показують, що опір провідників залежить не лише від речовини, а й від довжини провідника l та площі його поперечного перерізу S . Якщо за сталої напруги, сталої температури та інших незмінних зовнішніх умов довжину провідника з певної речовини збільшити у 2 рази, то й сила струму зменшиться у 2 рази. При збільшенні довжини провідника у 3, 4 і т. д. разів сила струму у відповідну кількість разів стає меншою, а опір провідника збільшується (мал. 2.41).

В однакових за розмірами провідниках з різних речовин сила струму різна при однаковій напрузі на них



Мал. 2.41. Графік залежності сили струму в провіднику від його довжини

Можна зробити висновок про пряму пропорційну залежність опору металевго провідника R від його довжини l : $R \sim l$.

Аналогічно можна дослідити залежність опору провідника від площі поперечного перерізу S . Площу поперечного перерізу провідника легко збільшити у 2, 3 і т. д. разів. Провідник можна порізати на шматки однакової довжини, а потім сплести їх по 2 шматки, по 3 шматки і т. д. Площа поперечного перерізу одержаних провідників зростає у 2, 3 і т. д. разів.

Дослідження показують, якщо за сталої напруги, незмінних зовнішніх умов, у тому числі й температури, площу поперечного перерізу провідника збільшувати у певну кількість разів, то у таку саму кількість разів зростатиме сила струму в колі (мал. 2.42), а отже, опір у таку саму кількість разів зменшуватиметься. Між опором провідника R та його площею поперечного перерізу існує обернено пропорційна залежність:

$$R \sim \frac{1}{S}.$$

За одиницю опору взято опір, який створює провідник струму в 1 ампер при напрузі на його кінцях 1 вольт:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

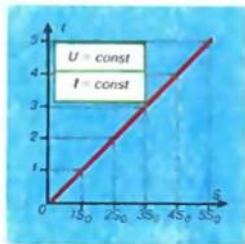
Одиниця опору названа омом на честь німецького фізика Георга Ома (1787—1854).

Якщо опір провідника позначити літерою R , його довжину l , а площу поперечного перерізу S , то формула для обчислення його опору матиме такий вигляд:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ — коефіцієнт, що характеризує електричні властивості речовини, з якої виготовлено провідник. Цей коефіцієнт назива-

ють коефіцієнтом опору. За незмінної напруги та незмінних зовнішніх умов опір металевго провідника прямо пропорційний до його довжини



Мал. 2.42. Графік залежності сили струму в провіднику від його площі поперечного перерізу

За однакової напруги та незмінних зовнішніх умов опір металевго провідника обернено пропорційний до його площі поперечного перерізу

$$\begin{aligned} \text{Одиниця опору} &= \\ &= \frac{\text{одиниця напруги}}{\text{одиниця сили струму}} \end{aligned}$$

Застосовують й інші одиниці опору:

міліом ($1 \text{ мОм} = 10^{-3} \text{ Ом}$),

кілоом ($1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$),

мегаом ($1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$) тощо

ється питомим опором речовини, з якої виготовлено провідник.

З формули для визначення опору провідника знаходимо формулу для визначення питомого опору:

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

Тепер можна легко встановити одиницю для вимірювання питомого опору. Оскільки одиниця опору — Ом, одиниця площі поперечного перерізу — м², а одиниця довжини — м, то одиниця питомого опору

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}}, \text{ або } 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

На практиці площу значно зручніше виражати в квадратних міліметрах, тому досить часто використовують таку одиницю питомого опору: $1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Оскільки опір металевих провідників залежить від температури (він зростає у разі підвищення температури), то в довідниках значення питомих опорів речовин наведені для певної температури, наприклад для $t = 20^\circ\text{C}$.

Таблиця 7. Питомий електричний опір деяких речовин $\rho \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (або $10^{-2} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$) при 20°C

Речовина	ρ	Речовина	ρ
Алюміній	2,8	Мідь	1,7
Вольфрам	5,5	Нікелін	42
Константан	50	Ніхром	110
Латунь	7,1	Срібло	1,6

Приклад. Якої довжини потрібно взяти провідник з константану для виготовлення реостата з опором 30 Ом (реостат — прилад для регулювання сили струму в електричних колах), якщо площа поперечного перерізу провідника 1 мм².

Коефіцієнт, що характеризує електричні властивості речовини, з якої виготовлено провідник, називається питомим опором цієї речовини

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}}, \text{ або } 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$1 \frac{\text{Ом} \cdot 1 \text{ мм}^2}{1 \text{ м}}$$

Дано:

$$\begin{array}{l} R = 30 \text{ Ом} \\ S = 1 \text{ мм}^2 \\ l = ? \end{array}$$

Розв'язання:

Використаємо формулу, до якої входять величини, що є в умові задачі:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ звідки } l = \frac{RS}{\rho}$$

Значення ρ константану візьмемо з довідкових таблиць:

$$\rho = 0,50 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$\text{Тоді } l = \frac{30 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ мм}^2}{0,50 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}} = 60 \text{ м.}$$

Відповідь. Для виготовлення реостата потрібно взяти провідник завдовжки 60 м.

- ?
1. Як можна показати, що опір провідників залежить від речовини, з яких вони виготовлені?
 2. Чим пояснюється наявність опору струму у провідників?
 3. Що беруть за одиницю опору?
 4. Що таке питомий опір? Якими одиницями він визначається?

ВПРАВА 17

1. Довжина одного провідника становить 20 см, а іншого — 1,6 м. Провідники виготовлені з однакової речовини і мають однаковий переріз. У якого провідника опір більший і у скільки разів?
2. Який опір має провідник з алюмінію завдовжки 80 м і площею поперечного перерізу 2 мм^2 ?
3. Спираль електричної плитки виготовлено з ніхромового провідника завдовжки 13,75 м і площею поперечного перерізу $0,1 \text{ мм}^2$. Який опір має цей провідник за кімнатної температури ($t = 20^\circ \text{C}$)? Чи такий самий опір матиме цей провідник, якщо плитку ввімкнути в мережу?

§ 36. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРІДНОЇ ДІЛЯНКИ КОЛА

Під час вивчення струму в електричних колах для опису різних явищ використовують три найважливіші фізичні величини: силу струму, напругу, опір.

Один із найважливіших законів учіння про електричні явища, що пов'язує між собою силу струму, напругу і опір для ділянки кола, встановив німецький учитель фізики і вчений Георг Сімон Ом. Цей закон і був названий його іменем.

Як джерело струму Ом використав у досліді термоелемент, що складався з мідного і вісмутового провідників. Виконавши дуже ретельні вимірювання, Ом встановив: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна її опору:

$$I = \frac{U}{R},$$

де I — сила струму в ділянці кола; U — напруга на цій ділянці; R — опір ділянки.

Ом описав закон у праці «Гальванічне коло, розроблене математично». Як зазначалось, опір провідників залежить від температури та інших зовнішніх впливів. Тому забезпечити дослідження «чистими» дослідом досить складно. Не слід дивуватися, що досліди на підтвердження закону Ома, які ви можете виконати, не завжди вдаватимуться.

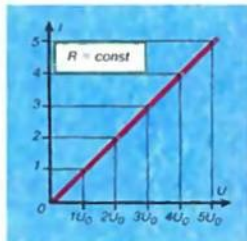
Графік залежності сили струму від напруги за умови, що опір ділянки кола залишається сталим, поданий на мал. 2.43, а графік залежності сили струму від опору за сталої температури — на мал. 2.44.

За законом Ома можна розрахувати силу струму в ділянці кола $I = \frac{U}{R}$, напругу на її кінцях $U = IR$ та опір ділянки кола $R = \frac{U}{I}$.

Але з останньої формули не випливає, що опір залежить від напруги чи сили струму. Відомо, що опір провідника залежить від його речовини, довжини та площі попереч-



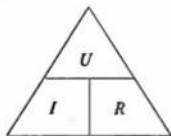
Ом Георг Сімон (1787—1854) — німецький фізик, учитель математики і фізики. Основні праці присвячені електриці, вчінню про звуки, оптиці. У 1826 р. експериментально встановив закон, що об'єднує такі фізичні величини, як сила струму, напруга, опір. У 1827 р. теоретично обґрунтував закони (Ома) для ділянки та повного кола.



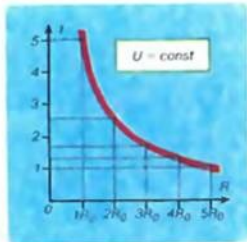
Мал. 2.43. Графік залежності сили струму в провіднику від напруги при сталому його опорі

ного перерізу $R = \rho \frac{l}{S}$, а також від температури. Так, наприклад, опір спіралі електричної лампи в робочому стані (лампа світиться) приблизно у 8 разів більший від опору в холодному стані (20 °C).

Якщо вам ще бракує навичок у виконанні математичних дій за формулами, що подібні до закону Ома, то можна скористатися наведеним трикутником (мал. 2.45). Якщо потрібно знайти силу струму I , то закриваємо цю літеру і читаємо відповідь: $I = \frac{U}{R}$, якщо потрібно визначити опір R , то відповідь буде $R = \frac{U}{I}$, а для визначення напруги: $U = IR$.



Мал. 2.45. Трикутник для визначення сили струму, напруги і опору за законом Ома

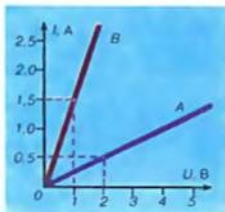


Мал. 2.44. Графік залежності сили струму в провіднику від його опору при сталій напрузі на ньому

- ?
1. Про зв'язок яких електричних величин йдеться в законі Ома для ділянки кола?
 2. Як залежить сила струму від напруги на ділянці кола? Накресліть відповідний графік і поясніть його.
 3. Як залежить сила струму від опору ділянки кола? Накресліть відповідний графік.
 4. Як формулюється закон Ома для ділянки кола? Запишіть формулу.
 5. Знайдіть опір ділянки кола з закону Ома. Чому не можна сказати, що опір у цьому випадку прямо пропорційний до напруги і обернено пропорційний до сили струму?

ВПРАВА 18

- Напруга в кімнатній електричній мережі 220 В, а опір нагрівального елемента праски — 50 Ом. Яка сила струму в нагрівальному елементі?
- Розгляньте лампу для кишенькового ліхтарика і поясніть написи, що є на її цоколі. За цими даними знайдіть опір спіралі цієї лампи в робочому стані.



Мал. 2.46. Графік залежності сили струму від напруги для двох провідників

- Розгляньте графіки залежності сили струму від напруги для двох провідників *A* і *B* (мал. 2.46). Який із провідників має більший опір? Відповідь поясніть. Визначте опір кожного з провідників.
- На мал. 2.47 наведені вимірювальні прилади, що показують силу струму і напругу в провіднику з опором *R*. Накресліть схему приєднання приладів до провідника та визначте його опір за показами приладів.
- У таблиці наведені дані про значення різних електричних величин для ділянок кола. Перенесіть таблицю в свої зошити і заповніть порожні клітини:



Мал. 2.47. Шкали амперметра і вольтметра

№	I , А	U , В	R , Ом
1	2	1	
2	0,5		4,0
3		2,5	15

- Провідник завдовжки 1 км має опір 5,6 Ом і силу струму 7 мА. Яка напруга на кінцях цього провідника? Який питомий опір речовини цього провідника, якщо його поперечний переріз 4 мм²?

Вимірювання опору провідників за допомогою амперметра і вольтметра

Мета: навчитися вимірювати опори провідників за допомогою закону Ома для ділянки кола.

Обладнання (див. с. 99): джерело постійного струму з напругою до 6 В (1 або 4); вольтметр і амперметр лабораторні (9, 10); ключ (7), з'єднувальні провідники; 2 дротяні резистори з опором 1...4 Ом (3).

Виконання роботи

1. Накресліть схему електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних джерела постійного струму, ключа, амперметра і двох дротяних резисторів.

2. Після перевірки схеми вчителем складіть електричне коло, яке також повинен перевірити вчитель.

3. Замкніть електричне коло за допомогою ключа і виміряйте силу струму в колі, запишіть її значення. Вимкніть струм.

4. Приєднайте вольтметр до першого резистора, вимкніть струм і виміряйте напругу на першому резисторі, записавши її значення; вимкніть струм.

5. Приєднайте вольтметр до другого резистора, вимкніть струм і виміряйте напругу на другому ре-

зисторі, запишіть її значення і вимкніть струм.

6. За одержаними даними розрахуйте значення опору першого $R_1 = \frac{U_1}{I}$ і другого $R_2 = \frac{U_2}{I}$ резисторів.

Порівняйте ці значення з тими, що нанесені на резисторах. Якщо є розбіжності у виміряних і нанесених значеннях опорів, то спробуйте це пояснити.

7. Порівняйте значення опорів резисторів і значення напруг на них, коли вони з'єднані послідовно. Спробуйте зробити висновки. Виміряйте загальну напругу на обох резисторах і порівняйте з сумою напруг на них.

8. Розберіть електричне коло і приєднайте робоче місце у належний робочий стан.

§ 37. РЕОСТАТИ

Під час користування електричною енергією часто доводиться змінювати силу струму в колі. Так, наприклад, щоб збільшити швидкість руху електропотягу, тро-

дребуса чи трамвая, збільшують силу струму в їх електродвигунах.

Прилади, які застосовуються для регулювання сили струму в електричних колах за допомогою зміни їх опору, називаються реостатами.

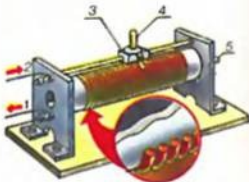
Найчастіше використовуються повзунокві реостати (мал. 2.48). Такий реостат складається з вогнетривкого, наприклад фарфорового, циліндра-ізолятора, на який щільно намотаний виток до витка провідник із значним питомим опором, наприклад з константану, опір якого мало змінюється при зміні температури. Дротина (провідник) покрита окалиною, що ізолює кожен виток від сусідніх. Кінці провідника, намотаного на ізолятор, приєднуються до клем 1 і 5, розташованих біля кінців обмотки.

Над обмоткою розміщено металевий стержень, ізольований від намотки реостата, на якому може рухатися повзунок 3 з ізоляційною ручкою 4. Повзунок щільно притискається своїми пружинними контактами до обмотки реостата, у місцях контакту ізоляція на обмотці руйнується, що забезпечує надійний контакт повзунка з обмоткою.

Для регулювання сили струму в колі (зміни опору активної частини реостата) провідники від електричного кола приєднуються до клем 2 стержня і до клем 1 або 5. Перемішуючи повзунок стержня, можна змінювати опір реостата практично від 0 до максимального значення опору його обмотки.

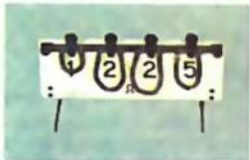
Можуть бути реостати й інших конструкцій, наприклад такі, де опір змінюють не плавно. Це так звані магазинні резисторів (мал. 2.49). У цьому магазині можна змінювати опір ступінчасто, через 1 Ом.

Реостати й магазинні резисторів завжди розраховуються на певні значення опору, сили струму, які обов'язково вказуються на



Мал. 2.48. Бузова повзункового реостата

Активною частиною реостата називається та частина його обмотки, через яку проходить струм



Мал. 2.49. Магазинні резисторів

них. Перевищувати значення сили струму для конкретних реостатів не слід, оскільки це може призвести до їх псування внаслідок перегріву обмоток.

Під час роботи з реостатами не слід торкатися руками до їхніх робочих частин, оскільки вони можуть бути сильно нагрітими.

Схема реостата наведена на мал. 2.50.



Мал. 2.50. Схема реостата
1 — повзунок; 2, 3 — клем

- ?
1. Для чого застосовуються реостати?
 2. Поясніть дію повзункового реостата.
 3. Що таке магазин резисторів та чим він відрізняється від повзункового реостата?
 4. Накресліть схему повзункового реостата і покажіть, як його необхідно ввімкнути, щоб під час руху повзунка зліва направо:
а) опір реостата зростав від нуля до максимуму; б) зменшувався від максимуму до нуля.

ВПРАВА 19

1. Розгляньте лабораторний реостат і розрахуйте, яку максимальну напругу до нього можна прикласти.
2. Який питомий опір провідника, з якого виготовлено обмотку реостата?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Регулювання сили струму за допомогою реостата

Мета: навчитися користуватися реостатом для регулювання сили струму в електричному колі та вдосконалити уміння складати електричні кола, вимірювати в них силу струму, напругу та опір за допомогою амперметра і вольтметра.

Обладнання (див. с. 99): джерело постійного струму з напругою до 6 В (1 або 4); вольтметр і амперметр лабораторні (9 і 10); реостат (6); ключ (7); з'єднувальні провідники.

Виконання роботи

1. Накресліть схему послідовного з'єднання джерела струму, ключа, амперметра і реостата. Реостат необхідно увімкнути так,

щоб під час руху повзунка зліва направо його опір зменшувався від максимального значення.

2. Після перевірки схеми учителем складіть за нею електричне коло, приєднавши вольтметр паралельно до реостата. Після перевірки кола учителем увімкніть струм.

3. Запишіть значення сили струму в колі при максимальному опорі реостата (I_{\min}) і максимальне значення напруги на ньому U_{\max} . Вимкніть струм. Визначте значення опору реостата і порівняйте з написом на ньому.

4. Увімкніть струм і зменшуйте опір реостата так, щоб сила

струму в колі дорівнювала 1А. Запишіть значення напруги на реостаті. Вимкніть струм. Визначте опір активної частини реостата.

5. Увімкніть струм і за допомогою реостата доведіть силу струму в колі до 2 А (якщо це можливо). Визначте при цьому опір активної частини реостата.

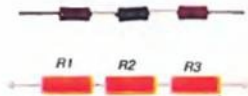
Зробіть висновки щодо застосування реостата для регулювання сили струму в електричному колі.

§ 38. ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

Під час вивчення електричного струму ви вже чимало разів зустрічалися з послідовним та паралельним з'єднаннями провідників, резисторів, вимірювальних приладів тощо.

Послідовним вважають таке з'єднання провідників, споживачів електричної енергії, джерел струму тощо, при якому провідники з'єднуються один за одним (мал. 2.51). Так, послідовно з'єднуються лампи ялинкової гірлянди, розраховані на 2,5 В; 3,5 В; 6,3 В; 13,6 В; 24 В тощо, при потребі вимкнення у мережу з напругою 220 В. При цьому напруга на кожній лампі не повинна бути більшою, ніж напруга у мережі. Якщо для гірлянди взяти однакові лампи на 24 В кожна, то їх потрібно не менше $\frac{220 \text{ В}}{24 \text{ В}} \approx 10$ штук.

При послідовному з'єднанні провідників струм не розгалужується



Мал. 2.51. Послідовне з'єднання провідників

Послідовно з'єднуються три гальванічні елементи з напругою 1,5 В кожний, щоб одержати батарею для кишенькового ліхтарика на 4,5 В (мал. 2.52), а також реостат з двигуном швейної електричної машинки для регулювання сили струму в ньому (кількості обертів за хвилину).

Оскільки при послідовному з'єднанні струм нікуди не відгалужується, то, як ви вже бачили під час виконання лабораторної роботи, сила струму в усіх точках такого замкненого кола однакова:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

З'єднуючи провідники послідовно, ми ніби збільшуємо загальну довжину провідника.

Загальний опір кола чи його ділянки при такому з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників (або окремих ділянок кола):

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Оскільки при послідовному з'єднанні сила струму в усіх точках кола однакова, а напруга на будь-якій ділянці кола визначається добутком сили струму на опір цієї ділянки $U = IR$, то напруга на окремих ділянках прямо пропорційна до їхніх опорів: на ділянці з більшим опором напруга, відповідно, більша.

Загальна напруга на кінцях послідовного з'єднання дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Головним недоліком послідовного з'єднання є те, що у разі виходу з ладу одного з елементів з'єднання перестають діяти й усі інші елементи. Скажімо, якщо згорить одна з ламп гірлянди, то перестають світитися й усі інші лампи.



Мал. 2.52. Гальванічні елементи, з'єднані послідовно

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

При послідовному з'єднанні провідників напруга на них прямо пропорційна до їхніх опорів

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Приклад. Два провідники з опором 1 і 4 Ом з'єднані послідовно. Сила струму в провідниках 1 А. Який опір такої ділянки кола? Яка напруга на кожному з провідників та загальна напруга на ділянці кола?

Дано:

$$R_1 = 1 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 4 \text{ Ом}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$R = ? \quad U_1 = ?$$

$$U_2 = ? \quad U = ?$$

Розв'язання:

Накреслимо схему такої ділянки і покажемо на ній необхідні позначення. Оскільки сила струму при послідовному з'єднанні провідників у всіх точках ділянки кола однакова, то $I_1 = I_2 = I = 1 \text{ А}$.

Загальний опір ділянки кола:

$$R = R_1 + R_2; R = 1 \text{ Ом} + 4 \text{ Ом} = 5 \text{ Ом}.$$

Загальна напруга на всій ділянці кола: $U = IR; U = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}$.

Напруга на кожному з провідників:

$$U_1 = IR_1; U_1 = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}; U_2 = IR_2; U_2 = 1 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом} = 4 \text{ В}.$$

Можна було б спочатку визначити напругу на кожному з провідників, а потім знайти їх суму:

$$U = U_1 + U_2; U = 1 \text{ В} + 4 \text{ В} = 5 \text{ В}.$$

Відповідь. Загальний опір ділянки кола $R = 5 \text{ Ом}$; загальна напруга на всій ділянці кола 5 В; напруга на першому провіднику 1 В, а на другому — 4 В.

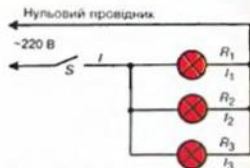
- ?** 1. Яке з'єднання елементів електричного кола називають послідовним?
- 2. Накресліть схеми послідовного з'єднання трьох однакових ламп, трьох гальванічних елементів та трьох резисторів з опором 1 Ом, 2 Ом і 4 Ом: а) яка сила струму в кожній із ламп; б) як розподіляється напруга на лампах; в) яка напруга батареї з трьох гальванічних елементів, якщо кожен з них мав напругу 1,5 В; г) який сумарний опір ділянки кола з послідовно з'єднаних резисторів; д) як розподілиться напруга на трьох резисторах, якщо загальна напруга, що прикладена до них, 14 В?

§ 39. ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

Паралельним називається таке з'єднання провідників, джерел струму, споживачів тощо, при якому одні кінці всіх провідників чи інших елементів кола приєднуються до однієї точки електричного кола, а інші кінці — до іншої. При цьому струм у точках з'єднання розгалужується.

На мал. 2.53 показана схема паралельного з'єднання трьох ламп у люстрі, які вмикаються і вимикаються одним вимикачем.

На мал. 2.54 наведена схема освітлення кімнати, де кожна з ламп вмикається і ви-



Мал. 2.53. Схема з'єднання ламп у люстрі, коли всі лампи вмикаються одним вимикачем

микається незалежно від інших. Якщо паралельно з'єднати три однакові гальванічні елементи в батарею (мал. 2.55), то напруга на полюсах батареї буде такою самою, як і на кожному з елементів. Але власний опір батареї зменшиться у 3 рази і від неї можна буде при потребі одержати більшу силу струму. Про це ви докладніше дізнаєтесь при подальшому вивченні фізики.

При паралельному з'єднанні, наприклад ламп (мал. 2.53), струм, що йде від джерела, розгалужується на кілька струмів за кількістю ввімкнених споживачів. Кожен із споживачів може мати свої значення опорів R_1 , R_2 , R_3 . Точки, в яких відбувається розгалуження струму, називаються точками розгалуження. Паралельно з'єднуються споживачі в освітлювальній мережі та в мережі телефонного зв'язку.

Оскільки початки і кінці всіх віток розгалуженої ділянки кола з'єднуються в одних і тих самих точках, то напруга на кінцях усього розгалуження є такою самою, як і напруга на кінцях окремих віток даного розгалуження:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

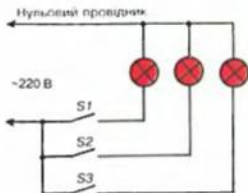
Якщо за допомогою амперметрів виміряти силу струму I до розгалуження і сили струму в кожній вітці розгалуження (мал. 2.56), то можна перекоонатися в тому, що сила струму в нерозгалуженій частині кола при паралельному з'єднанні дорівнює сумі сил струмів у окремих вітках розгалуження:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

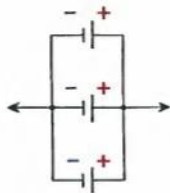
Загальний опір при паралельному з'єднанні провідників можна визначити за формулою

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

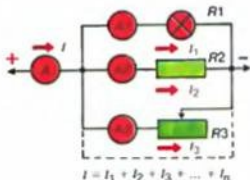
де R — загальний опір ділянки кола; R_1 , R_2 , ..., R_n — опори паралельних віток, що входять до даного розгалуження.



Мал. 2.54. Схема з'єднання ламп у кімнаті, коли кожна з них може вмикатися окремо від інших



Мал. 2.55. Схема паралельного з'єднання гальванічних елементів у батареї



Мал. 2.56. Взаємозв'язок між силою струму в кожній вітці розгалуження

Якщо паралельно з'єднано n провідників з однаковим опором R , то загальний опір такого розгалуження

$$R_{\text{заг}} = \frac{R}{n}.$$

Так, якщо з'єднати паралельно два однакові резистори з опором 3 Ом кожен, то загальний опір такої ділянки кола буде дорівнювати 1,5 Ом, а якщо три резистори, то 1 Ом.

Відомо, що напруга на всіх вітках паралельного розгалуження однакова, тому можна легко знайти сили струму в кожній вітці (мал. 2.57):

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Якщо знайти співвідношення сил струмів $I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$, то можна зроби-

ти такий висновок: при паралельному з'єднанні провідників сили струму у вітках обернено пропорційні до їхніх опорів.

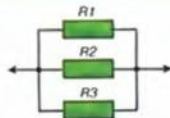
На практиці часто зустрічається складне або змішане з'єднання провідників, яке є комбінацією послідовних і паралельних з'єднань. З'ясуємо, як розраховуються такі з'єднання.

На мал. 2.58 показано можливе з'єднання трьох резисторів з опорами R_1 , R_2 , R_3 . Два перші резистори з'єднані між собою паралельно, і їхній загальний опір можна знайти за формулою

$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2};$$

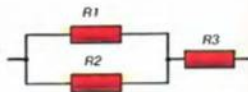
$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Третій резистор до ділянки приєднаний послідовно. Опір всієї ділянки кола дорівнюватиме



Мал. 2.57. Паралельне з'єднання провідників

При паралельному з'єднанні провідників сили струму в них обернено пропорційні до їхніх опорів



Мал. 2.58. Паралельне і послідовне (змішане) з'єднання провідників (1 варіант)

$$R_{1,2,3} = R_{1,2} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$

Можливе також з'єднання, що показано на мал. 2.59. Тут резистори R_1 і R_2 з'єднані між собою послідовно, і їхній сумарний опір $R_{1,2} = R_1 + R_2$. Резистор R_3 приєднаний до них паралельно, тому

$$\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{(R_1 + R_2)R_3}.$$

Звідси опір усієї ділянки кола становить

$$R_{1,2,3} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Навчившись розраховувати найпростіші електричні кола, можна досить легко розраховувати і більш складні.

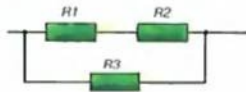
При розв'язуванні задач з використанням формул типу $\frac{1}{x} = \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}$ зручно користуватися наведеною на мал. 2.60 номограмою, яка дає змогу, не виконуючи обчислень, знаходити наближені значення величин.

У шкільному курсі фізики такою номограмою зручно користуватися під час розрахунків у разі паралельного з'єднання резисторів (провідників) для визначення загального опору за формулою $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$,

розрахунків за формулою лінзи $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$

тощо.

Наприклад, резистори з опором 43 і 75 кОм з'єднані паралельно; треба визначити їх загальний опір. Кладемо лінійку так, щоб на відрізок OX_1 було 43, а на відрізок OX_2 — 75. Відповідь маємо на відрізок OX — це ≈ 27 кОм. Зрозуміло, що з трьох величин, які входять до формули, можна



Мал. 2.59. Послідовне і паралельне (змінане) з'єднання провідників (II варіант)



Мал. 2.60. Номограма для визначення опору будь-якої кількості з'єднаних паралельно провідників

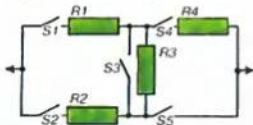
знайти будь-яку з них, якщо дві інші відомі.

Такою номограмою можна скористатись і для будь-якої кількості додаваних значень $\frac{1}{x}$, послідовно поєднуючи їх по двох.

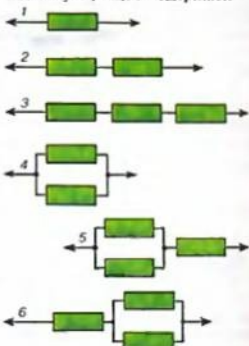
- ?
1. Які з'єднання називаються паралельними?
 2. Яка з основних електричних величин є однаковою для всіх віток паралельного з'єднання?
 3. Який взаємозв'язок сили струму до розгалуження і сил струмів у окремих вітках розгалуження?
 4. Накресліть кілька схем змішаних розгалужень. Як розрахувати їхні опори?
 5. Як з'єднані лампи та інші споживачі електричної енергії у вашій квартирі?

ВПРАВА 20

1. На мал. 2.61, а зображено схему електричного кола, в якому всі резистори однакові і мають опір 10 Ом кожний ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$): а) які вимикачі треба ввімкнути, щоб одержати з'єднання резисторів, що показані на мал. 2.61, б? б) обчисліть опір електричного кола (див. мал. 2.61, а) за всіх можливих положень вимикачів; в) які вимикачі треба ввімкнути, щоб опір R ділянки кола (див. мал. 2.61, а) дорівнював 5, 10, 15, 20 і 30 Ом? г) як має бути замкнене коло, щоб у підвідних провідниках до даного електричного кола (див. мал. 2.61, а) сила струму становила 2; 1 і 0,5 А, якщо до кола прикладена напруга 10 В?



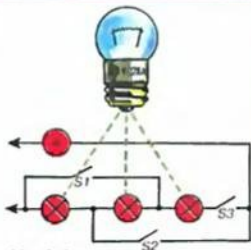
Мал. 2.61, а



Мал. 2.61, б

2. За схемою (мал. 2.62) дайте відповіді на запитання: а) які ключі необхідно увімкнути, щоб світилися на повну потужність: одна лампа; дві лампи; три лампи? б) які значення сил струмів у кожному з цих трьох випадків покаже амперметр? До кола подається стала напруга 6,3 В.

3. Накресліть схему вмикання люстри з трьох ламп, якщо за допомогою одного вимикача вмикається одна лампа, а за допомогою другого — дві інші.



Мал. 2.62

§ 40. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

При проходженні електричного струму через будь-яке тіло електрична енергія перетворюється в теплову (провідник нагрівається), механічну (електродвигун приводить у рух машини і механізми), хімічну (заряджається акумулятор) тощо, а будь-яке перетворення енергії з одного виду в інший характеризується виконанням роботи.

Роботу електричних сил у цьому випадку легко підрахувати. Відомо, що напруга U на кінцях ділянки кола дорівнює роботі, що виконується при перенесенні зарядженими частинками в цій ділянці заряду в 1 Кл:

$$U = \frac{A}{q},$$

$$U = \frac{A}{q}$$

де A — робота; q — електричний заряд; U — напруга.

З цієї формули можна легко визначити роботу: $A = Uq$ і зробити висновок: для визначення роботи електричного струму на будь-якій ділянці кола треба напругу на цій

дільниці кола помножити на заряд, у неї перенесений.

Електричний заряд можна визначити, якщо відомі сила струму в ділянці кола і час його проходження, тому можна одержати й іншу формулу для визначення роботи:

$$A = UIt.$$

За одиницю роботи електричного струму (як і будь-якої іншої роботи) було обрано джоуль, який дорівнює роботі, що виконується електричним струмом силою в 1 А при напрузі в 1 В протягом 1 с:

$$1 \text{ джоуль} = 1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер} \cdot 1 \text{ секунда}, \\ \text{або } 1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}.$$

Для вимірювання роботи електричного струму потрібно мати прилад, який би враховував напругу, силу струму і час його проходження. Такими приладами є електричні лічильники (мал. 2.64), що встановлюються скрізь, де використовується електрична енергія.

Щоб схарактеризувати швидкість виконання роботи, користуються поняттям потужності, яка дорівнює роботі, що виконується за одиницю часу. Потужність електричного струму позначають літерою P . Тому

$$P = \frac{A}{t}.$$

Роботу електричного струму можна визначати за формулою $A = UIt$. Можна легко знайти й іншу формулу для визначення потужності:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI; P = UI.$$

За одиницю потужності взято один ват (Вт), що дорівнює $1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

З формули $P = UI$ випливає, що

$$1 \text{ ват} = 1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер}, \text{ або} \\ 1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}.$$

$$A = UIt$$



Мал. 2.63. Електричний лічильник

$$P = \frac{A}{t} = UI$$

Використовують також й інші кратні одиниці:

мікроват ($1 \text{ мкВт} = 10^{-6} \text{ Вт}$),

міліват ($1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$),

гектоват ($1 \text{ гВт} = 10^2 \text{ Вт}$),

кіловат ($1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$),

мегават ($1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$) тощо

Оскільки робота струму може бути визначена через потужність і час: потужність визначається у ватах, час — у секундах, то досить часто використовують одиницю роботи, що називається ват-секундою: $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$, звідки $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$.

На практиці зручно також користуватися такими одиницями, як ват-година та кіло-ват-година:

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3\,600 \text{ Дж} = 3\,600 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 1\,000 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Для вимірювання потужності електричного струму використовуються ватметри (мал. 2.64), що враховують напругу і силу струму.



Мал. 2.64. Ватметр

Приклад. Звичайна електрична лампа, що є на вашому письмовому столі, має потужність 60 Вт і робочу напругу 220 В. Яку роботу виконує електричний струм у лампі, якщо протягом місяця ви працюєте, використовуючи лампу три години щодня? Яка сила струму в лампі та опір її спіралі в робочому стані?

Дано:

$$P = 60 \text{ Вт}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$t = 3 \text{ год} \cdot 30 \text{ днів}$$

Розв'язання:

$$\text{Час роботи лампи } t = 3 \text{ год} \cdot 30 = 90 \text{ год}.$$

$$A = Pt, A = 60 \text{ Вт} \cdot 90 \text{ год} = 5\,400 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 5,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сила струму в лампі з формули $P = UI$ становить

$$I = \frac{P}{U}; I = \frac{60 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,3 \text{ А}.$$

Опір спіралі лампи у робочому стані з закону Ома дорівнює

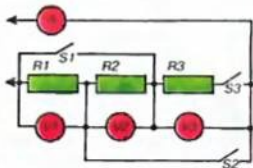
$$R = \frac{U}{I}; R = \frac{220 \text{ В}}{0,3 \text{ А}} \approx 730 \text{ Ом}.$$

Відповідь. $A = 5,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}; I \approx 0,3 \text{ А}; R \approx 730 \text{ Ом}.$

- ?
1. Чому дорівнює напруга на ділянці кола?
 2. Як визначається робота електричного струму на ділянці кола?
 3. Якими приладами вимірюють роботу електричного струму?
 4. Що називають потужністю та як її визначають?
 5. Які ви знаєте одиниці потужності та роботи, що використовуються в електриці?

ВПРАВА 21

1. Розгляньте дані, що написані на лампі для кишенькового ліхтарика, та за ними визначте: а) потужність струму в лампі; б) роботу, яку виконує струм за 15 хв роботи лампи; в) силу струму та опір спіралі лампи у робочому стані.
2. Що будуть показувати вимірювальні прилади в електричному колі, які зображені на малюнку, при всіх можливих положеннях вимикачів, якщо всі резистори в колі однакові, мають опір 10 Ом кожний і до кола подають сталу напругу 120 В?
3. Яка потужність електричного струму в ділянці кола (див. малюнок) при всіх можливих положеннях перемикачів? Опір кожного резистора 10 Ом. До ділянки прикладена напруга 120 В.



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Вимірювання роботи і потужності електричного струму

Мета: навчитися визначати потужність і роботу електричного струму в споживачах електричної енергії.

Обладнання (див. с. 99): джерело постійного струму (1 або 4), лампа для кишенькового ліхтарика (2), дрітаний резистор з опором 2...4 Ом (3), вольтметр і амперметр лабораторні (9 і 10), ключ (7), з'єднувальні провідники.

Виконання роботи

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних джерела струму, ключа, амперметра і лампи. Вольтметр приєднайте паралельно до лампи.

2. Після перевірки електричного кола вчителем увімкніть струм, виміряйте силу струму в колі і напругу на лампі та запишіть їх значення. Вимкніть струм.

3. Обчисліть: а) потужність струму в лампі; б) роботу електричного струму в лампі, якщо вона працювала 5 хв; в) опір спіралі лампи в робочому стані.

4. Виконайте всі зазначені завдання для дрітаноного резистора, увімкнувши його замість лампи.

5. Розберіть електричне коло і наведіть порядок на робочому місці.

На багатьох прикладах ви переконались у тому, що під час проходження струму провідники нагріваються — це прояв теплової дії струму.

Теплову дію електричного струму незалежно один від одного вивчали російський фізик Ленц Емілій Християнович та англійський учений Джоуль Джеймс-Прескотт. Вони експериментально встановили, що кількість теплоти, яка виділяється в провіднику під час проходження в ньому струму, пропорційна квадратові сили струму, опорів провідника й часові проходження струму:

$$Q = I^2 R t.$$

Цей висновок називається законом Джоуля—Ленца, а отримана формула є його математичним виразом. Формула дає можливість обчислювати кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму на будь-якій ділянці кола, незалежно від того, які в цій ділянці відбуваються процеси.

Скориставшись законом Ома та формулою для визначення потужності струму $P = UI$, можна одержати ще три формули для обчислення кількості теплоти, яка виділяється в провіднику під час проходження струму:

$$Q = I U t; \quad Q = \frac{U^2}{R} t; \quad Q = P t.$$

Ці формули можна застосовувати у випадку, коли електрична енергія в даній ділянці кола перетворюється лише у внутрішню енергію цієї ділянки (нагрівальні прилади тощо). Коли ж, наприклад, працює електродвигун, то повна робота струму



Ленц Емілій Християнович (1804—1865) — російський фізик. Основні праці з електромагнетизму. В 1842 р. незалежно від Джоуля встановив закон теплової дії електричного струму

$$Q = I^2 R t$$

$$Q = I U t; \quad Q = \frac{U^2}{R} t; \quad Q = P t$$



Джоуль Джеймс-Прескотт (1818—1889) — англійський фізик. Праці присвячені електромагнетизму, теплоті, закону збереження енергії. В 1841 р. встановив залежність кількості теплоти, що виділяється в провіднику при проходженні струму, від інших фізичних величин

визначається виразами IUt і Pt , якщо $P = IU$. З неї лише частина ($I^2 R t$) перетвориться на внутрішню енергію, а решта — на механічну.

Приклад. На побутовій електричній прасці є напис «220 В, 1000 Вт». Що означає цей напис? Яка кількість теплоти виділяється в прасці за 10 хв прасування, якщо вона автоматично не вимикається?

Дано:
 $U = 220 \text{ В}$
 $P = 1000 \text{ Вт}$
 $t = 60 \text{ с} \cdot 10 = 600 \text{ с}$
 $Q = ?$

Розв'язання:

Напис на прасці означає, що при робочій напрузі 220 В потужність струму в прасці 1000 Вт. Кількість теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, визначається за законом Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

Проте оскільки у прасці електрична енергія перетворюється лише на внутрішню енергію, то можна скористатися будь-якою формулою, що наведені у цьому параграфі. Найпростішою для цього випадку є формула:

$$Q = Pt.$$

$$\text{Отже, } Q = 1000 \text{ Вт} \cdot 600 \text{ с} = 600\,000 \text{ Дж} = 600 \text{ кДж} = 0,6 \text{ МДж}.$$

Відповідь. $Q = 0,6 \text{ МДж}$.

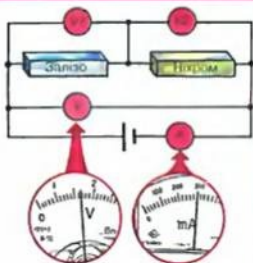
- ?
1. Чому під час проходження струму провідник нагрівається?
 2. За якою формулою можна обчислити кількість теплоти у провіднику зі струмом?
 3. У яких випадках для визначення кількості теплоти можна використовувати будь-яку з формул, наведених у цьому параграфі?

ВПРАВА 22

1. Яка кількість теплоти виділяється в дрітній спіралі опором 20 Ом за 30 хв при силі струму в ній 5 А?
2. До джерела струму приєднаємо три однакові за розміром (довжиною / площею поперечного перерізу S) провідники з міді, сталі і нікеліну. Який із провідників нагріється найбільше? Відповідь обґрунтуйте.

3. Розгляньте написи на електричних приладах, які є у вас удома. Поясніть ці написи. Чи можна за ними визначити кількість теплоти, що виділяється під час роботи цих приладів?

4. За даними схеми електричного кола, що наведена на малюнку, і покажи електровимірювальних приладів визначте: а) напруги, що показують вольтметри V_1 і V_2 ; б) опори кожного з провідників; в) потужності електричного струму в залізоному і ніхромовому провідниках, а також повну потужність; г) в якому з провідників виділяється більша кількість теплоти?



§ 42. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ДІЇ СТРУМУ НА ПРАКТИЦІ

Найпростішими і найпоширенішими електронагрівальними приладами є електричні лампи розжарювання, які відомі ще з XIX ст. завдяки працям російського інженера О. М. Лодигіна та видатного американського винахідника Томаса Едісона.

Спираль сучасних ламп розжарювання виготовляється з вольфрамового дроту, температура плавлення якого близько 3400°C (3387°C). Тутоплавкий матеріал вибирається тому, що в робочому стані спіралі сучасних ламп нагріваються до $3000\ldots 3100^{\circ}\text{C}$. При цьому одержується яскраво-жовте світло.

На мал. 2.65 показано будову ламп розжарювання, де 1 — це спіраль, що є джерелом світла. Вона приварюється електричним зварюванням до двох провідників, що проходять через скло балона лампи 2. Один провідник з'єднується з гвинтовою нарізкою цоколя лампи 3, а інший приєднується



Едісон Томас Алва (1847—1931) — американський винахідник у галузі електротехніки і підприємець. Розробив і впровадив промисловий зразок електричної лампи розжарювання, винайшов електричний лічильник, збудував першу в світі електричну станцію, удосконалив телефон, розробив систему запису звуку тощо

до центральної частини цоколя, яка ізольована від нарізки. Для з'єднання ламп з електричною мережею використовують так звані патрони різних типів.

Раніше лампи робили вакуумними — з їх балонів відкачували повітря, щоб у разі високих температур спіраль за наявності кисню швидко не згоряла. Але при цьому вольфрам спіралі випаровувався, що призводило до швидкого їх псування. В сучасних лампах повітря також відкачують, але замість нього балони наповнюють неактивними (інертними) газами, наприклад криптоном чи аргоном, що продовжує термін їхньої роботи.

Електричні праски, плити, кип'ятильники тощо мають принципово однакову будову: тут обов'язковими є електричні нагрівники, що виготовляються зі сплавів із значним питомим опором (наприклад, ніхром — сплав нікелю, заліза, хрому, марганцю), та з'єднувальні провідники; можуть бути вимикачі, різноманітні перемикачі, регулятори і таке ін.

Різнноманітні електричні нагрівники широко використовуються у промисловості та сільському господарстві.

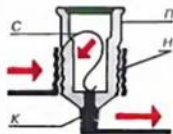
Дуже шкідливими для електричних кіл можуть бути короткі замикання. *Коротке замикання* — це таке з'єднання частин ділянки кола провідником, коли їх опір зменшується практично до нуля, а сила струму зростає, що призводить до псування елементів електричного кола, горіння і навіть пожежі.

Для захисту електричних кіл від струмів короткого замикання послідовно зі споживачами електричної енергії вмикають різноманітні запобіжники.

Найпростішими є так звані плавкі запобіжники. На мал. 2.66 показаний пробковий плавкий запобіжник, основною деталлю якого є дротина *С* з легкоплавкого ме-



Мал. 2.65. Бузова лампи розжарювання



Мал. 2.66. Пробковий плавкий запобіжник

талу (наприклад свинцю), що проходить у середині фарфорової пробки *П*. Пробка має гвинтову нарізку *Н* та центральний контакт *К*, до яких і припаяна свинцева дротина. Пробку вкручують у патрон. Зазвичай, у квартирних проводках передбачають два такі пробкові запобіжники. Коли сила струму різко зростає, то свинцева дротина швидко нагрівається і починає плавитися, що й призводить до розриву кола та припинення струму в ньому.

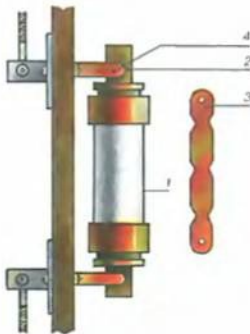
Запобіжники можуть бути не лише зі свинцю, а й у вигляді металених пластинок різної форми. На мал. 2.67 показаний трубчастий запобіжник, розрахований на значні сили струму. Запобіжник складається з фарфорової трубки *1*, яка запобігає розбризкуванню розплавленого металу у разі спрацювання запобіжника. На кінцях трубки закріплені контактні ножі *2*, до яких усередині трубки приєднуються легкоплавкі пластини *3* чи шматки відповідного дроту. Ножі запобіжника вставляють у пружинні контакти (пінцети) *4*, встановлені на щиті.

У телевізорах, радіоприймачах тощо, де сили струму незначні, можуть використовуватися скляні трубчасті запобіжники (мал. 2.68).

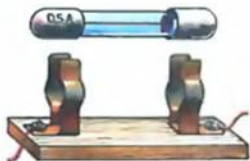
Тепер часто використовують автоматичні запобіжники — електромагнітні, теплові, електронні та інші пристрої, що розмикають електричні кола, якщо сила струму в них перевищує значення, на які вони розраховані.

Якщо будь-який запобіжник спрацював, то слід вимкнути напругу, що подається до кола, перевірити коло, знайти пошкодження і усунути його. Лише після цього можна встановити новий запобіжник (чи увімкнути автоматичний) й увімкнути напругу живлення.

У разі перегорання запобіжник треба замінити, а не використовувати будь-які провідники, так звані «жучки», оскільки це небезпечно.



Мал. 2.67. Трубчастий запобіжник



Мал. 2.68. Запобіжник радіоприймача чи телевізора

- ?
1. Наведіть приклади використання теплової дії струму в побуті?
 2. Яку будову мають лампи розжарювання? З чого виготовляють їх спіралі? На які напруги розраховані відомі вам лампи?
 3. Що таке коротке замикання? До чого воно призводить в електричному колі чи на його ділянці?
 4. Які ви знаєте запобіжники та як вони діють?

ВПРАВА 23

Розгляньте будь-яку лампу, що є у вашому будинку. За написами на ній визначте опір її спіралі в робочому стані й силу струму. Розрахуйте, на яку силу струму слід поставити до неї запобіжник, маючи на увазі, що в холодному стані (за кімнатної температури) опір спіралі лампи менший, ніж у робочому, майже у 8 разів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Визначення коефіцієнта корисної дії установки з електричним нагрівником

Мета: навчитися визначати коефіцієнт корисної дії установки з електричним нагрівником.

Обладнання: внутрішня посудина від калориметра; вимірювальний циліндр, мензурка чи склянка, за допомогою яких можна відміряти 100...150 мл води; посудина з водою; лабораторне джерело струму; амперметр; дрітаний електричний нагрівник з відомим опором; термометр; годинник; з'єднувальні провідники; реостат; ключ (вимикач).

Вказівки до роботи

У цьому випадку корисною будемо вважати електричну енергію, що йде на нагрівання води і яку можна визначити за формулою $Q = cm(t_2 - t_1)$, де c — питома теплоємність води; m — маса води; t_1 і t_2 — відповідно, початкова і кінцева температури води.

Повна кількість теплоти, що виділяється у нагрівнику з опором R та силою струму I , за час нагрівання Δt визначається за формулою закону Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

Оскільки коефіцієнт корисної дії (ККД) визначається відношен-

ням корисно виконаної роботи (витраченої енергії) до повної роботи, то

$$\text{ККД} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q} = \frac{cm(t_2 - t_1)}{I^2 R \Delta t},$$

де $Q_{\text{в}}$ — кількість теплоти, якої набула вода; Q — кількість теплоти, що виділяється у нагрівнику під час проходження струму.

З одержаної робочої формули бачимо, які фізичні величини необхідно знайти під час виконання роботи. Їх значення занести до своїх зошитів:

Маса води, що нагрівається, кг:
$m =$
Початкова температура води, °C:
$t_1 =$
Кінцева температура води, °C:
$t_2 =$
Час нагрівання, с:
$\Delta t =$
Сила струму в нагрівнику, А:
$I =$
Опір спіралі нагрівника, Ом:
$R =$
Питома теплосмність води, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$:
$c =$
(Узяти з довідкових таблиць.)

Виконання роботи

1. Налийте у внутрішню посудину калориметра 100... 150 мл води.

2. Складіть електричне коло з лабораторного джерела струму, ключа, амперметра, реостата, нагрівника. Струм не вмикати.

3. Виміряйте температуру води у внутрішній посудині калориметра і занесіть її значення до таблиці.

4. Увімкніть у колі струм, відмітивши за годинником час початку нагрівання.

5. За допомогою реостата встановіть у колі певну силу струму,

наприклад 1 А, яку й будете весь час підтримувати сталою.

6. Через 5...10 хвилин вимкніть струм і виміряйте кінцеву температуру води. Час нагрівання та температуру води занесіть до таблиці.

7. Наведіть порядок на робочому місці.

8. За одержаними даними визначте ККД установки.

9. Поясніть, де, на вашу думку, відбуваються «некорисні» втрати теплоти, що виділяється у нагрівнику.

Варіанти проведення роботи

1. Якщо опір нагрівника невідомий, то до кола потрібно ввести вольтметр, що приєднується до нагрівника. У цьому випадку повну кількість теплоти визначають за формулою $Q = IU\Delta t$.

2. У роботі можна використати вольтметр і нагрівник з відомим опором. Тоді

$$Q = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

1. Слід вважати, що:

- існують незаряджені та заряджені тіла або частинки, з яких складаються тіла;
- однойменно заряджені тіла або частинки відштовхуються, а різноіменно заряджені — притягуються;
- під час взаємодії різнорідних тіл вони заряджаються різноіменно;
- елементарні частинки, що входять до складу атомів і молекул, — це електрони, які мають негативний заряд, та протони, що мають позитивний заряд. Існують також елементарні частинки, які не мають заряду, наприклад нейтрони.

2. Заряджання і розряджання тіл пояснюється лише переходом тих чи інших заряджених частинок від одних тіл до інших.

3. Навколо заряджених тіл і частинок існує електричне поле, їх взаємодія здійснюється через електричні поля. Електричні поля існують реально, як реально існують тіла, молекули, атоми, елементарні частинки.

4. Тіло заряджене негативно, коли воно має надлишкову, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів, а позитивно — коли має меншу, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.

5. Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок або заряджених тіл.

6. У будь-якому джерелі електричного струму відбувається роз'єднання заряджених частинок за рахунок роботи сил, що не мають електричного походження.

7. Закон Кулона: сила взаємодії заряджених тіл, розмірами яких можна знехтувати, порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$.

8. Закон Ома для однорідної ділянки кола: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна її опору: $I = \frac{U}{R}$.

9. Закон Джоуля—Ленца: кількість теплоти, яка виділяється в провіднику під час проходження в ньому струму, пропорційна квадратові сили струму, опорів провідника й часові проходження струму: $Q = I^2 R t$.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

§ 43. МАГНІТНЕ ПОЛЕ СТРУМУ

Під час вивчення дій електричного струму ви вже дізналися, що найважливішою є магнітна дія, яку відкрив у 1820 р. датський учений Ерстед. Між собою взаємодіють прямі провідники і котушки зі струмом, провідники зі струмом і постійні магніти. Такі сили взаємодії називають *магнітними*.

Так, компас має магнітну стрілку, що є постійним магнітом з двома полюсами: північним і південним. Лінію, що сполучає полюси магнітної стрілки, називають її віссю.

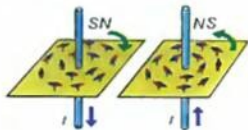
У досліді Ерстеда провідник зі струмом взаємодіє з магнітною стрілкою, що наводить на думку про існування навколо провідника зі струмом, як і навколо магнітної стрілки, магнітного поля.

Магнітне поле існує навколо будь-якого провідника зі струмом, навколо будь-якої рухомої зарядженої частинки або тіла. Електричний струм і магнітне поле невіддільні одне від одного.

Відомо, що навколо нерухомих заряджених частинок або тіл існує електричне поле. Якщо ці заряджені частинки чи тіла починають рухатися — виникає електричний струм і магнітне поле. Отже, струм слід вважати джерелом магнітного поля.

Якщо навколо прямого вертикального провідника зі струмом на перпендикулярній до провідника площині розмістити невеликі магнітні стрілочки (мал. 3.1), то на

Магнітну дію струму відкрив датський учений Ерстед у 1820 р.



Мал. 3.1. Дія магнітного поля провідника зі струмом на магнітні стрілочки

них дітяче магнітне поле провідника і їхні осі зорієнтовані певним чином, створюючи нібито замкнене коло. При зміні напрямку струму в провіднику на протилежний стрілки повертаються на 180° .

Якщо на картон, через який проходить провідник зі струмом (мал. 3.2), посипати залізні ошурки, то вони намагнітяться (стануть ніби маленькими магнітними стрілочками) й утворять концентричні кола.

Ліній, уздовж яких у магнітному полі розташовуються осі маленьких магнітних стрілочок, називають силовими лініями магнітного поля (насправді ці лінії слід називати лініями індукції магнітного поля, про що ви дізнаєтеся під час подальшого вивчення фізики).

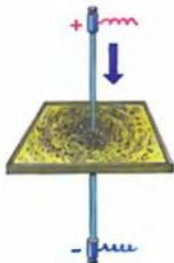
За напрям силових ліній магнітного поля взятий напрям, що показує північний полюс магнітної стрілки у кожній точці поля.

На мал. 3.3 показано розташування магнітних стрілок на площині, якщо на ній дивитися зверху. У випадку (а) струм напрямлений від нас, що умовно позначається кружечком з хрестиком. Магнітні стрілочки показують своїми північними полюсами, що сила, яка на них діє, напрямлена за годинниковою стрілкою.

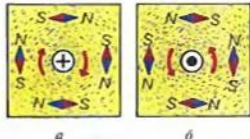
Коли ж напрям струму змінити на протилежний (б), то струм іде до нас, що позначається кружечком з точкою, і на північні полюси діють сили у напрямі проти руху годинникової стрілки.

Можна зробити висновок, який називається правилом свердлика: якщо свердлик закручувати у напрямі проходження струму (мал. 3.4), то напрям обертання його ручки покаже напрям силових ліній магнітного поля.

За будь-яких форм провідників зі струмом силові лінії магнітного поля не обо-



Мал. 3.2. Лінії магнітного поля



Мал. 3.3. Магнітні стрілки в магнітному полі провідника зі струмом



Мал. 3.4. Правило свердлика

п'язково будуть коловими, але обов'язково замкненими кривими. На мал. 3.5 умовно показане магнітне поле колового струму.

Для визначення напрямку силових ліній можуть використовуватися й інші правила, крім правила свердлика, але їхній результат буде таким самим.



Мал. 3.5. Магнітне поле колового струму

- ?
1. Які дії струму можна спостерігати під час його проходження у провіднику? Яка з дій найважливіша?
 2. У чому полягає дослід Ерстеда?
 3. Який зв'язок існує між електричним струмом і магнітним полем?
 4. Як і чому розміщуються залізнi ошурки в магнітному полі?
 5. Що називається силовими лініями магнітного поля і якими вони є завжди?
 6. За яким правилом можна визначити напрям силових ліній магнітного поля?

ВПРАВА 24

1. Визначте напрями силових ліній магнітного поля для випадків, що наведені на мал. 3.6.



2. На мал. 3.7 показані напрями силових ліній магнітного поля. Визначте напрям струму в провідниках, що показані кружечками (переріз провідників).



Мал. 3.6. Струми в провідниках

Мал. 3.7. Лінії магнітних полів

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Складання електромагніта і дослідження його дії

Мета: скласти електромагніт та дослідити його магнітну дію за допомогою компаса.

Обладнання: джерело постійного струму — гальванічний елемент чи батарея гальванічних елементів, лабораторне джерело по-

стійного струму тощо; реостат; ключ; з'єднувальні провідники; компас; деталі для складання електромагніта.

Виконання роботи

1. Накресліть схему електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних джерела постійного струму, ключа, реостата і котушки електромагніта.

2. Після перевірки учителем накресленої вами схеми складіть за нею електричне коло, увімкніть струм і за допомогою компаса визначте магнітні полюси котушки зі струмом. Вимкніть струм.

3. За допомогою відомих вам правил визначте, якими повинні бути полюси котушки, яку ви використовуєте в досліді. Порівняйте результати з одержаними даними в п. 2.

4. Розмістіть компас на такій відстані від котушки, щоб його стрілка відхилилася не дуже сильно. Вставте залізне осердя в котушку і спостерігайте за дією

електромагніта на стрілку. Зробіть висновок.

5. Складіть із використанням двох котушок підковоподібний магніт. З'єднайте котушки між собою і джерелом струму так, щоб при вмиканні струму на кінцях «підкови» виявилися різноіменні полюси електромагніта.

6. Увімкніть струм і за допомогою компаса встановіть полюси електромагніта. Порівняйте дані з п.5.

7. З'єднайте котушки так, щоб на кінцях «підкови» були одноіменні полюси. Увімкніть струм і перевірте результат за допомогою компаса.

8. Що потрібно зробити в п. 7, щоб полюси на кінцях «підкови» стали іншими?

§ 44. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Ви вже знаєте, що провідник зі струмом, наприклад виток, має магнітне поле, тобто вже є електромагнітом. Але магнітне поле такого магніту досить слабке. Посилити поле можна, якщо зробити кільце з багатьох витків зі струмом або ж намотати значну кількість витків на котушку з ізолятора. Така котушка зі струмом уже досить помітно притягує залізні предмети чи взаємодіє з постійними магнітами.

Якщо таку котушку зі струмом підвісити на тонких і гнучких провідниках (мал. 3.8), то вона у магнітному полі Землі встановлюється так, що її вісь показує напрям з півночі на південь, як і магнітна стрілка компаса. Отже, котушка зі струмом, як і постійний магніт, має два полюси — північний і південний.

Коли відомий напрям струму у витках котушки, то полюси можна визначити за правилом свердлика або за дещо зміненим його варіантом. Обертаючи, як і у разі кодового струму, ручку свердлика у напрямі проходження струму, ми за рухом його вістря визначаємо напрям силових ліній котушки і її полюси, пам'ятаючи, що силові лінії «виходять» з північного полюса, а «входять» у південний.

Полярність котушки зі струмом можна визначити також за допомогою правила правої руки (мал. 3.9): якщо праву руку покласти долонею на витки котушки так, щоб чотири пальці показували напрям струму у витках, то відігнутий великий палець покаже північний полюс котушки.

Варто знати, що котушка зі струмом може й не мати магнітного поля. Якщо провідник, з якого намотують котушку, перегнути навпіл (мал. 3.10), то при проходженні струму по ньому магнітні поля обох половин провідника компенсують одне одного і сумарного поля не буде. Намотана з такого перегнутого провідника котушка також не матиме магнітного поля.

Магнітне поле котушки зі струмом (соленоїд) діє тим сильніше, чим більша сила струму у витках і чим більша кількість витків припадає на одиницю довжини котушки.

Для магнітного поля котушки зі струмом різко збільшується у разі внесення в неї залізного стержня. Котушку з уміщенням у неї залізним сердечником називають електромаг-



Мал. 3.8 Котушка зі струмом у магнітному полі Землі

Полюси котушки зі струмом можна легко визначити за допомогою магнітної стрілки, беручи до уваги, що однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні — притягуються



Мал. 3.9. Визначення полярності котушки зі струмом за правилом правої руки



Мал. 3.10. Як зробити котушку зі струмом без магнітного поля

нітом. На мал. 3.11 показана будова прямо- лінійного електромагніта. Сердечники елек- тромагнітів виготовляють з так званого м'я- кого заліза або сплавів, що мають сильні магнітні властивості, наприклад зі сплаву заліза з нікелем та ін. Обмотку виготовля- ють з ізольованого дроту, намотаного зі значної кількості витків у кілька шарів на каркас котушки.

В електромагнітах магнітні властивості ви- никають лише під час проходження струму в обмотці. Коли ж струм вимкнути, то й магнітні властивості зникнуть, що зручно при практичному використанні електромагнітів.

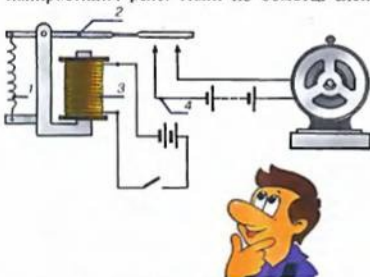
Електромагніти застосовуються в елек- тродвигунах і генераторах струму, телефон- них і телеграфних апаратах, підіймальних кранах і різноманітних автоматичних при- строях. На мал. 3.12 наведено електромаг- нит підіймального крана.

Важливим є застосування електромагні- тів у так званих електромагнітних реле — пристроях, що автоматично чи напівавто- матично керують тими чи іншими елек- тричними колами.

На мал. 3.13 показана схема одного з найпростіших реле. Коли по обмотці елек-



Мал. 3.11. Прямолінійний електромагніт



Мал. 3.13. Схема простого електромагнітного реле



Мал. 3.12. Модель електромагніта підіймального крана

немагніта 3 проходить керуючий струм невеликої сили, залізний сердечник електромагніта притягує залізну пластинку 2, котра замикає контакти 4 робочого кола, у яке ввімкнений електродвигун чи будь-які пристрої, що можуть бути ввімкнені з використанням реле. У разі розмикання керуючого кола пружина 1 відтягує пластину 2 вгору. Цим розмикається робоче коло.

§ 45. ПОСТІЙНІ МАГНІТИ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ

Ще в давнину люди знали, що деякі залізні руди притягують до себе залізо, нікель та деякі інші речовини. Це явище було назване магнетизмом, а шматки залізної руди, що мають магнітні властивості, назвали природними магнітами.

Одним із перших почав наукове дослідження магнетизму П'єр Персгрін, який у 1269 р. написав книжку «Листи про магніт», де зібрано багато відомостей про магніти. У цій книзі вже йшла мова про два полюси магніту, про притягування різноіменних полюсів і відштовхування одноіменних, про виготовлення штучних магнітів намагнічуванням «заліза, тїла тїроникнення магнітних сил через скло і воду, про компас тощо.

Але справді наукові дані про магнетизм були викладені Вільямом Гільбертом у праці «Про магніт, магнітні тіла і про великий магніт — Землю», що побачила світ у 1600 р. у Лондоні. Тут сформульовано висновки про найважливіші властивості магнітів:

1) різні частини магніту по-різному притягують залізні предмети; найсильніше притягують полюси магніту;

2) магніт завжди має два полюси: північний і південний; не може бути магніту з одним полюсом;

Магнітні властивості певних речовин були відомі китайцям ще в IV ст. до н. е. Пізніше вони виявили, що магніти завжди встановлюються у напрямку, що показує на північ чи південь. Такий показчик, мабуть, і був прообразом компаса. «Показевики півдня» у вигляді людини з витягнутою рукою встановлювали китайці на своїх колісницях.



Гільберт Вільям (1544—1603) — англійський фізик. Побудував перші теорії електрики і магнетизму. Вважається засновником справжньої науки про електрику.

3) різноіменні полюси магнітів притягуються, а однойменні — відштовхуються;

4) підвішений на нитці магніт розміщується так, що вказує напрям на північ і на південь;

5) земля є пелетенським магнітом.

На мал. 3.14 показані підковоподібний і штабовий магніти, що мають північний полюс *N* і південний *S*. Взаємодію магнітів можна пояснити тим, що магнітне поле одного магніту діє на другий магніт і, навпаки, магнітне поле другого магніту діє на перший. Лінії, уздовж яких діють магнітні сили, завжди замкнені, як і в котушці зі струмом. Поза магнітом ці лінії виходять з північного полюса і входять у південний, замикаючись усередині магніту.

На мал. 3.15 показане магнітне поле Землі. Південний магнітний полюс Землі знаходиться на півночі, але він не збігається точно з Північним географічним полюсом, а віддалений від нього приблизно на 2100 км.

Північний магнітний полюс Землі міститься поблизу Південного географічного полюса. Тому напрямки на північ і південь компас показує лише наближено.

Іноді спостерігаються так звані магнітні бурі, коли компас може не показувати правильно напрямку північ-південь. Це буває тоді, коли Сонце виявляє активність і в атмосферу Землі потрапляє значна кількість заряджених частинок, зокрема електронів і протонів.



Мал. 3.14. Підковоподібний та штабовий магніти



Мал. 3.15. Магнітне поле Землі

- ?
1. Що називають полюсами магніту?
 2. Як взаємодіють між собою полюси магнітів?
 3. Як за допомогою компаса можна виявити полюси магніту?
 4. Чому магнітна стрілка на Землі встановлюється у певному напрямі?
 5. Де знаходяться магнітні полюси Землі?
 6. Чим пояснюється наявність магнітних бур?

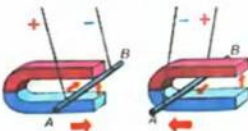
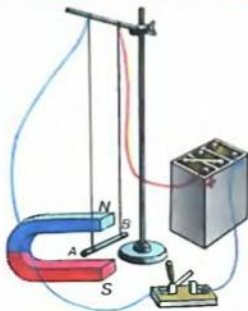
Коли помістити провідник зі струмом у магнітне поле, наприклад у поле постійного магніту (мал. 3.16), то за наявності у цьому провіднику струму, на нього діятиме механічна сила, що називається силою Ампера.

Ця сила виникає тому, що на кожну частинку, яка створює струм, діє магнітне поле постійного магніту, змінюючи напрям її руху. Частинки, що створюють струм, при цьому взаємодіють з атомами (йонами) металу і виникає **сила Ампера**.

Якщо прийняти підковоподібний магніт, то і за наявності струму в провіднику *AB* сила Ампера на нього не діятиме.

Якщо змінити напрям струму в провіднику *AB*, то й напрям сили Ампера зміниться на протилежний. Те саме відбувається, якщо поміняти місцями полюси постійного магніту.

Напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, можна визначити за правилом лівої руки (мал. 3.17): руку розміщують так, щоб долоня була повернута до пів-



Мал. 3.16. Провідник у магнітному полі



Мал. 3.17. Правило лівої руки

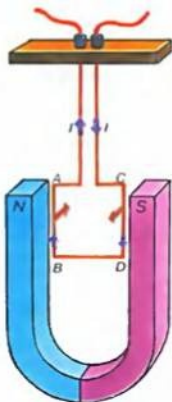
Сила, що діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом, називається **силою Ампера**

лічного полюса магніту, чотири пальці показували напрям струму в провіднику, то великий палець, відставлений на 90° , покаже напрям сили, що діє на провідник (сила Ампера).

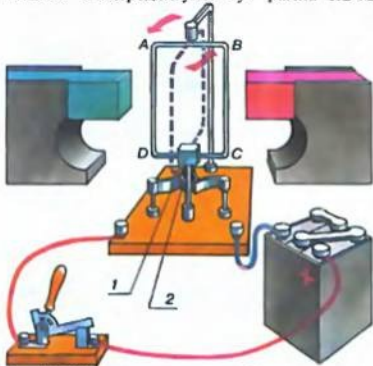
Ця сила є тим більшою, чим сильніше магнітне поле магніту і більша сила струму в провіднику. Залежить вона від довжини провідника та його розміщення у магнітному полі.

На практиці часто використовують дію магнітного поля на рамку зі струмом (мал. 3.18). На частини рамки AB і CD у магнітному полі діють сили у протилежних напрямках (у протилежних напрямках проходить у них струм) — рамка під дією цих сил повертається. Зрозуміло, що у разі зміни напрямку струму в рамці вона повертатиметься у протилежному напрямі. Те саме спостерігатимемо, якщо поміняти місцями полюси магніту.

На мал. 3.19 показана модель найпростішого електродвигуна: тут рамка $ABCD$



Мал. 3.18 Дія магнітного поля на рамку зі струмом



Мал. 3.19. Модель електродвигуна постійного струму

Сила Ампера тим більша, чим сильніше поле магніту і чим більша сила струму в провіднику. Вона також залежить від розміщення провідника у магнітному полі

встановлена на підшипниках вертикально. На рамку намотана обмотка, кінці якої приєднані до металевих півкілець 2, що ізольовані одне від одного. До півкілець притискуються пружні щітки 1, через які до рамки подається струм від джерела. Ви вже знаєте, що у разі проходження струму рамка повертається у певному напрямі. Але під час повертання рамки повертаються й півкілця. Одне з півкілець стане на місце іншого, і до нього вже буде притиснута інша щітка. Струм у рамці матиме протилежний напрям, унаслідок чого рамка буде обертатись у тому самому напрямі. Таке обертання рамки і використовується в електричних двигунах.

Замість постійних магнітів у двигунах використовують, в основному, електромагніти, що живляться від того самого джерела струму, що й рамка.

Один із перших у світі електричних двигунів, що міг бути використаний на практиці, винайшов у 1834 р. російський учений Якobi Борис Семенович.



Якobi Борис Семенович (1801—1874) — російський фізик і винахідник у галузі електротехніки. Сконструював перший магнітоелектричний двигун, відкрив у 1838 р. гальванопластику, розробив телеграфні апарати тощо.

- ?
1. Як можна показати, що магнітне поле діє на провідник зі струмом?
 2. Від чого залежить напрям сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі? Як цей напрям можна визначити?
 3. За допомогою якого пристрою можна змусити обертатися рамку зі струмом у магнітному полі? Поясніть дію такого пристрою.
 4. Назвіть відомі вам приклади застосування електричних двигунів.

§ 47. ЕЛЕКТРОВІМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Різні електровимірювальні прилади працюють за рахунок різноманітних взаємодій. Розглянемо принципи дії теплових, магнітоелектричних та електромагнітних приладів.

Теплові прилади (мал. 3.20). Якщо по провіднику I проходить електричний струм, то

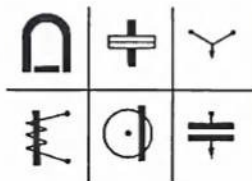


Мал. 3.20. Принцип дії приладів теплової системи

він нагрівається і стає довшим (розширюється). За допомогою розтяжок 3 і блока 4 провідник зв'язаний з пружиною 5. На осі міститься стрілка приладу.

Чим більша сила струму в провіднику 1, тим він сильніше видовжується і на більший кут повертається стрілка вимірювального механізму. На початку вимірювань за допомогою коректора 2 стрілка встановлюється на позначці «0». За допомогою такого приладу можна вимірювати силу струму, якщо його шкалу відповідно проградувати, наприклад за допомогою еталонного амперметра. Такий прилад називається амперметром теплової системи, а його умовне позначення самостійно знайдіть на мал. 3.21.

Магнітоелектричні прилади (мал. 3.22). У приладах магнітоелектричної системи є рамка 3 з певною кількістю витків, яка може обертатися між полюсами 4 постійного маг-



Мал. 3.21. Умовні позначення приладів різних систем



Мал. 3.22. Вимірювальний механізм магнітоелектричних приладів

ніту 1. Коли у витках рамки струму немає, то вона разом зі стрілкою утримується у певному положенні за допомогою пружинок 2.

Спеціальним пристроєм — коректором 5 у разі відсутності струму стрілку можна встановити на нульову поділку шкали приладу.

Пружинки не лише утримують стрілку в певному положенні, а й підводять струм до витків рамки.

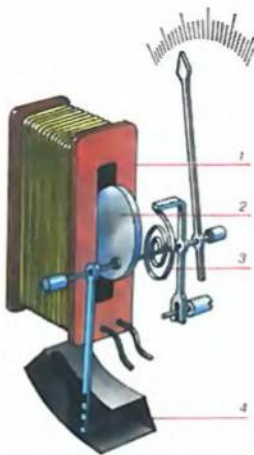
Коли по витках рамки проходить струм, то на неї діє сила з боку магнітного поля постійного магніту. Рамка повертається доти, доки сила, що діє на рамку, не буде зрівноважена силою пружності пружинок. Сила, що діє на рамку з боку магнітного поля, прямо пропорційна силі струму в рамці, і чим більша вона, тим на більший кут відхиляється стрілка.

Прилади магнітоселектричної системи чутливі й точні. Їх безпосередньо можна використовувати лише в колах постійного струму. Проте з випрямлячами вони можуть бути використані й у колах змінного струму.

У переважній більшості випадків такі прилади використовуються з шунтами (амперметри) чи додатковими опорами (вольтметри). Умовне позначення приладів такої системи знайдіть на мал. 3.21.

Електромагнітні прилади. У приладах електромагнітної системи (мал. 3.23) струм проходить по нерухомій котушці 1. У магнітне поле, що при цьому виникає, втягується сердечник 2, який намагнічується в магнітному полі, наприклад залізний. На одній осі з сердечником закріплена стрілка.

Сердечник втягується в котушку доти, доки дія магнітних сил не врівноважиться дією пружної сили пружинки 3. Під час вимірювань стрілка може тривалий час ко-



Мал. 3.23. Вимірювальний механізм електромагнітних приладів

ливатися. Тому часто використовують різні заспокоюючі пристрої, так звані демпфери 4. Завдяки опору повітря, що є в коробочці демпфера, коливання стрілки швидко припиняються. Всередині коробочки демпфера є лопатка, рух якої і гальмує повітря.

Прилади електромагнітної системи можуть використовуватись у колах як постійного, так і змінного струму. Умовне позначення приладів цієї системи знайдіть на мал. 3.21. Про інші позначення на цьому малюнку ви дізнаєтесь пізніше.

- ?
1. Поясніть принцип дії приладів теплової, магнітоелектричної та електромагнітної систем.
 - 2. Накресліть умовні позначення приладів кожної з систем.
 3. Для чого у вимірювальних приладах використовуються коректори; знайдіть їх на малюнках приладів.
 4. Для чого застосовуються демпфери?

§ 48. ЕЛЕКТРОДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Із принципом дії двигуна постійного струму ви вже ознайомилися (див. § 46).

У електродвигунах обмотка складається зі значної кількості витків ізоляованого дроту, вкладених у прорізи, зроблені уздовж бічної поверхні залізного циліндра. Залізний циліндр, на якому розміщені витки, підсилює магнітне поле струму. Такий циліндр з витками називається якорем двигуна (мал. 3.24). Магнітне поле, в якому обертається якорь такого двигуна, в малопотужних двигунах створюється постійним магнітом, а в потужних — електромагнітом.

Електродвигуни мають переваги перед іншими двигунами. Вони можуть мати найрізноманітніші потужності та розміри — від двигуна для годинника до двигуна для



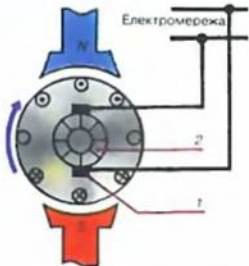
Мал. 3.24. Схема поперечного перерізу якоря двигуна

електровоза; екологічно безпечні; надійні; мають ККД до 98 % тощо.

У промислових двигунах замість півкілеш і шіток використовують так звані колектори, що складаються з пластинок, розмішених у значній кількості на якорі, та шіток, що розташовані на нерухомій частині двигуна — статорі. Це дає можливість вмикати у будь-який момент не всі витки якоря, а лише їх частину. На мал. 3.25 показаний розріз одного з таких двигунів.

Струм від мережі підводиться до обмотки якоря двигуна за допомогою шіток 1, що притискаються пружинами до колектора 2, який розподіляє струм так, щоб під північним полюсом він ішов у одному напрямі, а під південним — у протилежному.

Якір двигуна обертається безперервно доти, доки до нього подається струм.



Мал. 3.25. Принцип дії двигуна постійного струму

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

Вивчення електродвигуна постійного струму

Мета: ознайомитися з деталями електродвигуна та дослідити його дію.

Обладнання: підковоподібний магніт чи електромагніт; зібрана рухома частина двигуна на підставці; джерело постійного струму; ключ; з'єднувальні провідники.

Виконання роботи

1. Розгляньте деталі електродвигуна, знайдіть на якорі півкілеші чи колектор, шітки, через які подається струм до якоря.

2. Складіть електродвигун, після перенірки електричного кола вчителем увімкніть струм і приведіть двигун у дію. Відмітьте напрям обертання якоря двигуна.

3. Поміняйте на протилежну полярність вмикання джерела постійного струму. Увімкніть струм і відмітьте напрям обертання якоря. Зробіть висновок.

4. Що зміниться в роботі двигуна, якщо його магніт повернути на 180°?

- ?
1. За правилом лівої руки встановіть, чи правильно на мал. 3.25 показано напрям обертання якоря двигуна?
 2. Які переваги електричних двигунів порівняно з іншими ви знаєте?
 3. Які електродвигуни є у вас удома?

! ГОЛОВНЕ В РОЗДІЛІ 3

1. Магнітне поле існує навколо будь-якого провідника зі струмом, навколо будь-якої рухомої зарядженої частинки або тіла. Електричний струм і магнітне поле невіддільні одне від одного.
2. Нерухомі заряджені частинки або тіла мають електричне поле, якщо ж вони починають рухатись, створюючи електричний струм, то виникає й магнітне поле.
3. Силкові лінії магнітного поля завжди замкнені, їх напрям можна визначити за правилом свердлика. У постійних магнітів силкові лінії «виходять» з північного полюса і «входять» у південний, замикаючись усередині магніту.
4. На провідник зі струмом у магнітному полі діє механічна сила — так звана сила Ампера. Вона має максимальне значення тоді, коли кут між напрямками струму і силових ліній магнітного поля 90° , і дорівнює нулю, коли цей кут 0° .
5. Магніти мають такі властивості:
 - різні частини магніту по-різному притягують залізні предмети; найсильніше притягують полюси магніту;
 - магніт завжди має два полюси: північний і південний; немає магнітів з одним полюсом;
 - різнойменні полюси магнітів притягуються, а однойменні — відштовхуються;
 - підвішений горизонтально на нитці магніт показує напрям північ—південь.

СВІТЛОВІ ЯВИЩА

§ 49. ЩО ТАКЕ СВІТЛО

Світло — одне з найдивовижніших явищ природи. Під впливом світла і тепла розвивається і підтримується життя на Землі, а можливо, й на інших планетах Всесвіту. Світло дає можливість отримати багато відомостей про навколишній світ.

Ще давні люди використовували багаття для одержання світла, воно їх обігрівало, освітлювало житло, відлякувало звірів. Спочатку це було світло багать, що утворились природним способом, наприклад від удару блискавки. Таке багаття підтримувалося протягом тривалого часу. Пізніше людина навчилася розводити багаття за допомогою тертя, а також використовувати кресало (залізний предмет), кремінь та жмут легкорозпалюваної речовини.

Деякі небесні тіла власного світла не випромінюють, а лише відбивають світло, що падає на них від інших тіл. Наприклад, Місяць чи Земля відбивають світло, що надходить до них від Сонця.

То що ж таке світло? Оскільки світло нагріває предмети, на які падає, то можна зробити висновок про те, що воно передає цим тілам енергію, яка переноситься даним видом випромінювання. Світло — це один із видів хвиль, а саме електромагнітні, які на відміну від механічних хвиль (звук, хвилі на поверхні води тощо) можуть поширюватися й у вакуумі. Людина за допомогою органів зору бачить не всі електромагнітні хвилі. Радіохвилі, рентгенівські про-

Під впливом світла і тепла розвивається і підтримується життя на Землі



Мал. 4.1. Полярне сивьо — природне джерело світла

мені тощо людина не сприймає очима, тому були створені відповідні оптичні прилади.

Упродовж свого історичного розвитку людство створило безліч оптичних приладів (слово оптика походить від грецького *op*, що означає бачити, або *optike* — наука про зорові відчуття).

За допомогою телескопа Г. Галілей відкрив гори і кратери на Місяці, супутники Юпітера, показав, що Чумацький Шлях є скупченням величезної кількості зірок тощо.

Мікроскоп дав можливість дослідити мікроорганізми, будову клітин живих організмів, що дало змогу підняти біологію на високий рівень розвитку.

До оптичних приладів можна віднести і освітлювальні лампи, і фари автомобіля, і телевизор, і кінопроектор, і окуляри тощо.

Світлове випромінювання створюють джерела світла, які можуть бути природними і штучними (мал. 4.1, 4.2). Природні джерела світла: Сонце, зорі, блискавка, полярні сяйва, гниючі пеньки, деякі види комах, риб тощо. Штучні джерела світла: свічка, лампи різних типів, екран телевізора, лазер тощо.

Світло ми бачимо тоді, коли в очі потрапляє випромінювання лише з певною довжиною хвилі.

Ми вже говорили про те, що світло — це електромагнітні хвилі. Світло дуже дивовижне явище. Це ще й потік частинок — так званих фотонів, що також широко використовуються, але про це ви вже дізнаєтесь при подальшому вивченні фізики.



Мал. 4.2. Штучні джерела світла

- ?
1. Розкажіть про роль світла у житті людини і всього живого на Землі.
 2. Які оптичні прилади ви знаєте?
 3. Яке випромінювання є світлом?
 4. Чим відрізняється випромінювання праски чи кип'ятильника від випромінювання електричної лампи розжарювання?

Упродовж усього життя людина стикається з оптичними явищами, через те значна кількість закономірностей поширення світла була відома ще у давнину. У дослідженнях світлових явищ здавна використувалось поняття променя світла. Промінь — це лінія, вздовж якої поширюється світло. Змодельювати промінь можна за допомогою вузьких пучків світла, які можуть бути одержані за допомогою отворів у непрозорих екранах тощо. Один з найдавніших законів можна висловити так: в однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно.

Прямолінійність поширення світла підтверджується утворенням тіні та напівтіні. Щоб світло від лампи під час роботи не потрапляло в очі, на лампу ставлять непрозору перепону, наприклад абажур.

Утворення тіні розглянемо на досліді. Якщо взяти невеличке джерело світла S (мал. 4.3) і поставити екран E , то на всю поверхню екрана падатиме світло. Якщо тепер між джерелом світла і екраном поставити непрозоре тіло, то на екрані побачимо темне зображення обрисів непрозорого тіла, оскільки за цим тілом утвориться тінь — простір, куди не потрапляє світло від джерела S . Якби світло поширювалось не прямолінійно, то на екрані ми не побачили б чіткого зображення перепони. При подальшому вивченні фізики ви дізнаєтесь, що бувають і відхилення від прямолінійності поширення світла.

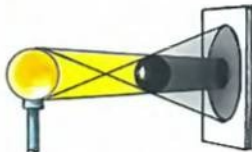
Якщо ж джерело світла взяти порівняно велике (мал. 4.4), то на екрані навколо тіні утвориться ще й напівтінь (півтінь).

У цьому випадку джерело світла вже не можна вважати точковим, воно складається

Промінь — це лінія, вздовж якої поширюється світло



Мал. 4.3. Утворення тіні



Мал. 4.4. Тінь і напівтінь

з безлічі точок, кожна з яких випромінює світло. На екрані існують ділянки, куди світло зовсім не потрапляє (це тінь), а є й такі, куди світло від одних точок потрапляє, а від інших — ні. Саме в цих місцях спостерігається півтінь.

Утворенням тіні і напівтіні пояснюються сонячні й місячні затемнення. Коли спостерігається сонячне затемнення, то повна тінь від Місяця (мал. 4.5) падає на Землю.



Мал. 4.5. Сонячне затемнення — схема утворення

З цього місця Землі Сонця не видно. Це буває лише тоді, коли Сонце, Місяць і Земля перебувають на одній лінії. На мал. 4.6 показано повне сонячне затемнення, що відбулося 26 лютого 1998 р. Воно тривало 3 хв 39 с і спостерігалось на півночі Колумбії й Венесуели та на деяких островах Карибського регіону.

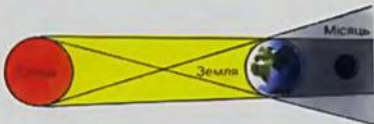
Під час сонячних затемнень можна вивчати зорі, атмосферу Сонця тощо, що має велике наукове значення.

Коли ж Місяць, обертаючись навколо Землі, потрапляє в її тінь (мал. 4.7), то спостерігається місячне затемнення.

Утворенням тіні і напівтіні пояснюються сонячні й місячні затемнення



Мал. 4.6. Повне затемнення Сонця



Мал. 4.7. Місячне затемнення

Прямолінійність поширення світла здавна застосовувалась у будівництві, під час прокладання доріг і визначення висоти предметів тощо.

- ❓ 1. Що таке промінь світла?
2. У чому суть закону прямолінійного поширення світла?
3. Наведіть приклади щодо підтвердження прямолінійності поширення світла.
4. У яких випадках може спостерігатися тінь?
5. Як відбуваються сонячні і місячні затемнення?

ВПРАВА 25

1. В аркуші непрозорого паперу зробіть отвір діаметром 3...5 мм, візьміть аркуш білого паперу і на ньому спробуйте одержати зображення вікна за допомогою отвору. Зображення буде перевернутим, не досить яскравим. Поясніть його утворення.
2. Візьміть рівну палицю, довжину якої можна виміряти, і в сонячний день визначте висоту дерева, що росте біля вашого будинку.
3. На мал. 4.8 показано дослід — утворення тіні та напівтіні від лампочки S_1 червоного кольору та S_2 — синього. Накресліть схему в зошиті і розфарбуйте малюнок відповідними олівцями. Чому дослід підтверджує закон прямолінійного поширення світла?



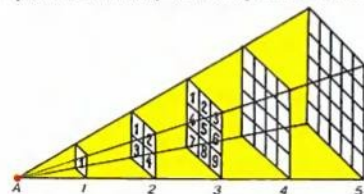
Мал. 4.8

§ 51. ЧОМУ В СОНЯЧНИЙ ДЕНЬ УРАНЦІ ТА ВВЕЧЕРІ ПРОХОЛОДНО, А ВДЕНЬ ТЕПЛО

Світло нагріває предмети, на які воно падає, більш чи менш освітлюючи їх. Від чого ж залежить енергія, яку приносить світло на ту або іншу поверхню?

Кожен із власного досвіду знає, що чим ближче ми підходимо до багаття, тим нам тепліше, і освітленість зменшується зі збільшенням відстані від джерела. У чому ж річ?

Розглянемо мал. 4.9. Маємо точкове джерело світла, розміщене в точці *A*, яке випромінює світло у всіх напрямках однако-



Мал. 4.9. Зміна освітленості поверхні залежно від відстані до джерела

во. Виділимо пучок світла у вигляді піраміди з квадратним перерізом. Зробимо перерізи піраміди через відстані, які відносяться як $1 : 2 : 3 : 4 : 5$, тобто шоразу відстань від джерела зростатиме на одне й те саме значення $A-1$. Легко помітити, що площі перерізу відносяться як $1 : 4 : 9 : 16 : 25$.

За законом збереження енергії на кожен з перерізів припадає одне й те саме значення енергії світла, а на одиницю поверхні припадає енергія, яка відноситься як $1 : \frac{1}{4} : \frac{1}{9} : \frac{1}{16} : \frac{1}{25}$ і т. д. Можна зробити висно-

вок: значення енергії, що потрапляє на одиницю поверхні від світної точки, обернено пропорційне квадрату відстані від точки до поверхні.

Усі ці міркування підтверджуються ретельними вимірюваннями.

Унаслідок цього на планетах, що ближчі до Сонця, ніж Земля, тепліше, ніж на Землі, а на планетах, то розташовані від Сонця далі,— холодніше.

Якщо ми наблизимось до багаття на удвічі меншу відстань, то воно нас «краще грітиме» приблизно (бо багаття не є точковим джерелом світла) у 4 рази

Значення енергії, що потрапляє на одиницю поверхні від світної точки, обернено пропорційне квадрату відстані від точки до поверхні

Проте існує ще одна причина, що впливає на отримання тілом енергії світла. Нехай паралельний пучок світла, наприклад від Сонця, падає на поверхню перпендикулярно (мал. 4.10, а). Ця поверхня одержує певне значення енергії.

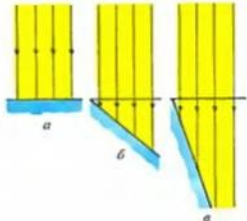
Тепер той самий пучок світла падає на поверхню під певним кутом і енергія вже розподіляється на значно більшу поверхню (мал. 4.10, б), тоді й освітленість одиниці поверхні вже буде меншою, як і кількість теплоти.

Якщо збільшити кут між падаючими променями і поверхнею (мал. 4.10, в), то світлова енергія на одиницю поверхні ще зменшиться. Якщо промені будуть ковзати вздовж поверхні, то вона не буде нагріватися зовсім.

Отже, вранці й увечері сонячні промені ковзають вздовж поверхні Землі і слабо її нагрівають, а вдень Сонце стоїть високо в небі і Земля нагрівається значно краще.

Ви, мабуть, спостерігали, що влітку Сонце піднімається високо над горизонтом, а взимку навіть у полудень воно перебуває досить низько. Тому в нас узимку холодно, а влітку жарко, хоча Земля у той час, коли в нас зима, знаходиться ближче до Сонця, ніж влітку. Ви також напевно помічали, що сніг швидше тане на схилах, які перпендикулярні до сонячних променів.

Унаслідок одержання різної кількості сонячної енергії й змінюються пори року на Землі.



Мал. 4.10. Паралельний пучок світла падає на поверхні під різними кутами

Унаслідок одержання різної кількості сонячної енергії й змінюються пори року

- ?
1. Чому на екваторі завжди тепліше, ніж у середніх широтах, де ми живемо?
 2. Чому на Північному та Південному полюсах холодно навіть влітку?
 3. Як зміниться освітленість екрана в кінотеатрі, якщо віддаль до нього від кінопроектора збільшити у 2 рази?

З відбиванням світла кожен з нас стикається щоденно. Так, ми часто дивимося у дзеркало, прообразом якого, мабуть, була рівна поверхня води, де вперше людина побачила своє зображення, а також зображення Сонця, Місяця, дерев та інших предметів. Це так зване дзеркальне відбивання світла, що зумовлено рівною поверхнею відбиваючого тіла. Дзеркало може відбивати від 70 до 90 % світла, що на нього падає.

Проте й аркуш білого паперу чи поверхня чистого снігу відбиває практично таку саму кількість світла, але ніяких зображень ми при цьому не бачимо. Це зумовлено нерівністю поверхні снігу чи аркуша паперу.

Таке розсіяння світла (розсіяне або дифузне відбивання) легко можна пояснити, якщо порівняти відбивання його від плоского дзеркала та аркуша паперу (мал. 4.11).

Дзеркальна поверхня відбиває світло у цілком певному напрямку (мал. 4.11, а). У разі відбивання світла від нерівної поверхні кожна її точка відбиває світло лише у «своєму» напрямку (мал. 4.11, б), що й призводить до розсіювання світла у всіх напрямках.

Важливе значення мають обидва види відбивання. Важко уявити життя без дзеркала. Але уявіть собі дзеркальний екран у кінотеатрі — чи всі глядачі бачили б однаково добре зображення на ньому?

Дослідимо дзеркальне відбивання світла за допомогою оптичного диска.

Диск складається з білого круга, по краях якого нанесені поділки, що дають можливість відлічувати значення кутів. По краю круга може рухатися освітлювач, що дає вузький промінь світла (мал. 4.12). У центрі диска закріплено плоске дзеркало.



а



б

Мал. 4.11. Дзеркальне і розсіяне відбивання світла



Мал. 4.12. Диск для дослідження законів відбивання світла

Проміні AO (падаючий) відбивається в точці O (промінь OB — відбитий) практично без втрати енергії світла. Під час виконання досліду можна зробити висновок, який формулюється у вигляді першого закону відбивання: **падаючий і відбитий промені, а також перпендикуляр до відбиваючої поверхні, поставлений у точку падіння променя, лежать в одній площині.** Цей самий закон можна сформулювати й дещо по-іншому: **кут падіння і кут відбивання ($\angle AOC$ і $\angle COB$) лежать в одній площині.**

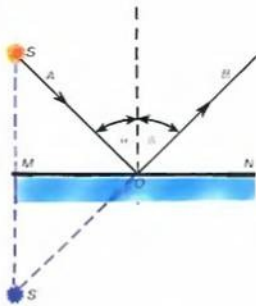
Якщо в досліді вимірювати кути падіння й кути відбивання за різних їхніх значень, то можна зробити висновок, що і є другим законом відбивання: **кут відбивання дорівнює куту падіння.**

Із законів відбивання випливає дуже важливе твердження: промінь падаючий і промінь відбитий можуть мінятися місцями. Якщо падаючий промінь пустити у напрямку BO (мал. 4.13), то відбитий промінь піде у напрямку OA .

Важливим є і такий висновок. Розглянемо плоске дзеркало MN , площина якого перпендикулярна до площини малюнка. Нехай AO — падаючий промінь. Це світло від джерела S , що падає на поверхню дзеркала. OB — відбитий промінь. Продовжимо відбитий промінь «за дзеркало». Якщо будемо дивитися на дзеркало у напрямі BO , то світлу точку ми побачимо як точку S' , що симетрична до точки S відносно дзеркала. Хоч насправді світної точки S' немає, оскільки дзеркало непрозоре, а тому й ніяких променів з другого його боку немає.

Кути падіння і відбивання лежать в одній площині

Кут відбивання дорівнює куту падіння

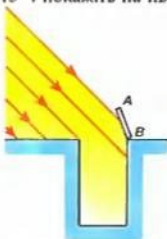


Мал. 4.13. Закон відбивання

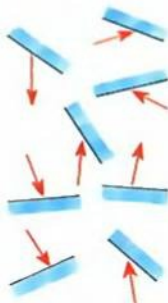
- ?
1. Чим відрізняється дзеркальне відбивання від розсіяного (дифузного)?
 2. За якими дослідami встановлено закони відбивання світла? Сформулюйте ці закони.
 3. Яку властивість мають падаючий і відбитий промені (її називають оборотністю)?

ВПРАВА 26

1. Зробіть креслення за мал. 4.14. Покажіть для кожного випадку розміщення відбитого та падаючого променів, кути падіння та кути відбивання.
2. Висота Сонця така, що його промені з горизонтом утворюють кут 40° . Зробіть креслення за мал. 4.15 і покажіть на ньому, як слід розмістити дзеркало, щоб «зайчик» потрапив на дно колодязя.
3. Кут падіння променя на плоске дзеркало 45° . Накресліть відбитий промінь, а також покажіть падаючий і відбитий промені для кута падіння 60° .



Мал. 4.15



Мал. 4.14

§ 53. ПЛОСКІ, УВІГНУТІ Й ОПУКЛІ ДЗЕРКАЛА ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Окрім плоских дзеркал, які нам добре відомі, існують ще й дзеркала інших конфігурацій: це увігнуті дзеркала в кишенькових ліхтариках і фарах автомобілів, а також опуклі дзеркала широкого огляду в машинах чи на вулицях.

Коли ми дивимось на себе у плоске дзеркало, нам здається, що наше зображення є реальним і міститься воно за дзеркалом, хоча там ніякого зображення немає. Це зображення утворюється лише завдяки спільній дії плоского дзеркала й ока.



Мал. 4.16. Сприймання оком предмета

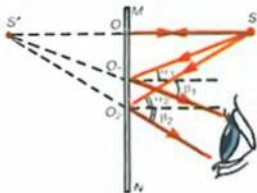
Розглянемо, як око сприймає звичайний предмет, без будь-яких дзеркал (мал. 4.16). Від кожної точки полум'я свічки в усіх напрямках розходяться промені світла. Частина з них розбіжним пучком потрапляє в око. Око сприймає точку в тому місці, звідки йдуть промені, тобто у місці їх перетину, де насправді й розміщена точка.

На мал. 4.17 показано, як сприймає око зображення точки в дзеркалі. Всі з виділених променів SO , SO_1 і SO_2 відбиваються від дзеркала відповідно до законів відбивання. Промінь SO падає на дзеркало під кутом падіння 0° і під таким самим кутом відбивається, не потрапляючи в око. Інші два відбиті промені потрапляють в око розбіжним пучком, і око бачить світну точку за дзеркалом у точці S' . Насправді в точці S' промені не сходяться, тому таке зображення називають **уявним**.

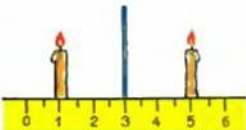
Щоб упевнитись у тому, що точки S і S' симетричні відносно дзеркала, виконаємо простий дослід (мал. 4.18). Розмістимо вертикально плоский кусок скла, що виконуватиме роль напівпрозорого дзеркала. Оскільки скло прозоре, то ми бачитимемо й усе те, що міститься за склом. Якщо перед склом поставити свічку, ми побачимо у склі її зображення. За склом поставимо таку саму, але незапалену свічку і пересунатимемо її вздовж лінійки доти, доки вона не стане здаватись запаленою. Це означає, що свічка незапалена і зображення запаленої свічки збігаються.

Якщо тепер виміряти відстані від свічки, що світить, до дзеркала і відстані від дзеркала до незапаленої свічки, то вони будуть однаковими. Отже, світна точка та її зображення в плоскому дзеркалі є симетричними.

Досліди показують, що зображення предмета у плоскому дзеркалі уявне, пряме,



Мал. 4.17. Оглядання зображення світної точки в оці при використанні дзеркала



Мал. 4.18. Дослід — свічка у напівпрозорому дзеркалі

за розмірами дорівнює предмету і розташоване на такій самій відстані від дзеркала, як ним, що й сам предмет перед дзеркалом. При цьому правий бік предмета здається лівим, і навпаки.

Для спостереження за поверхнею моря з невеликої глибини або за місцевістю з окопу використовують найпростіші прилади, до яких входять два плоскі дзеркала, — перископи (від грецького *periskopeo* — дивлюся навколо, оглядаю), один з яких зображений на мал. 4.19. Спробуйте пояснити його дію.

Увігнуті або опуклі дзеркала найчастіше бувають сферичними, тобто їх відбиваюча поверхня є частиною кулі (сфери). На мал. 4.20 показані дзеркала: увігнуте, що відбиває світло увігнутою поверхнею (а), та опукле, що відбиває світло опуклою поверхнею (б). O — центр сферичної поверхні, що утворює дзеркало, а C — центр дзеркала. Якщо з'єднати ці точки, то одержимо лінію, яка називається головною оптичною віссю дзеркала.

Якщо з'єднати центр сферичної поверхні з будь-якою точкою самого дзеркала, то це буде побічна вісь сферичного дзеркала, і таких осей у дзеркала безліч, а головна оптична вісь лише одна.

Якщо на увігнуте сферичне дзеркало пустити світловий пучок паралельно до головної оптичної осі, то всі промені, відбившись від дзеркала, зберуться практично в одній точці на цій осі, яка називається *головним фокусом дзеркала* (мал. 4.21). Головний фокус розміщений посередині між центром дзеркала і центром сферичної поверхні, що утворює це дзеркало.

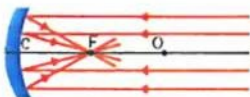
Якщо скористатися великим увігнутим дзеркалом, то в фокусі можна нагріти будь-яке тіло до дуже високої температури. Поблизу фокуса дзеркала значних розмірів можна готувати їжу, розміщати паровий



Мал. 4.19. Перископ



Мал. 4.20. Увігнуте та опукле дзеркала



Мал. 4.21. Хід променів в увігнутому сферичному дзеркалі

котел для виробництва електричної енергії за рахунок енергії Сонця тощо.

Коли в головному фокусі такого дзеркала помістити точкове джерело світла, то світло після відбивання від дзеркала буде поширюватись майже паралельним пучком на дуже велику відстань. Так можна передавати необхідну інформацію, закодовану відповідним чином, навіть у космічному просторі.

Якщо на увігнуте сферичне дзеркало падає пучок світла паралельно до побічної осі, то світло також збереться у фокусі, але не в головному, а побічному. Таких фокусів, як і побічних осей, у дзеркала безліч. Вони утворюють так звану фокальну площину, що проходить через головний фокус перпендикулярно до головної осі.

Опуклі дзеркала дають уявні, зменшені зображення «за дзеркалом». Дзеркала різних видів широко використовуються при виготовленні телескопів, фототехніки тощо.

Коли в головному фокусі великого увігнутого дзеркала помістити точкове джерело світла, то світло після відбивання від дзеркала буде поширюватись майже паралельним пучком на дуже велику відстань.

- ?
1. Чому плоске дзеркало передає точне зображення предмета?
 2. Отримайте зображення предмета, наприклад вікна, за допомогою увігнутого дзеркала і поясніть, за якими принципами ви це зробили.
 3. Чому в кишеньковому ліхтарику намагаються зробити світловий пучок паралельним? Як це зробити?
 4. Поясніть дію приладу, в якому використано чотири плоскі дзеркала (мал. 4.22). Де такий прилад можна використати?
 5. Із дзеркалец та картону виготовте невеликий перископ та дослідіть його дію.



Мал. 4.22

Відбивання і заломлення світлових променів відбувається на межі прозорих середовищ, де світло поширюється з різними швидкостями. Якщо опустити в посудину з водою олівець чи ложку, то вони здаються зламаними (мал. 4.23).



Мал. 4.23. Фотографія «зламаний» олівець

Якщо, наприклад, у скляну порожню посудину падає промінь світла, то він не змінює напрямку свого поширення. Коли в цю посудину налити рідину, наприклад воду, то на межі повітря й води промінь заломиться (мал. 4.24) і далі буде поширюватися прямолінійно.

На мал. 4.25, а показано, як відбиваються і заломлюються світлові промені на поверхні розділу середовищ, коли швидкість поширення світла в середовищі 1 більша за швидкість поширення світла у середовищі 2 ($v_1 > v_2$), а на мал. 4.25, б — навпаки $v_1 < v_2$.

Як бачимо, у першому випадку кут заломлення менший від кута падіння світла ($\gamma < \alpha$), а у другому — більший ($\gamma > \alpha$).

Розглянемо закони відбивання світла у поєднанні з законами заломлення.



Мал. 4.24. Фотографія поширення променя світла в однорідних середовищах (повітря і вода) і його заломлення на межі цих середовищ

Відбивання і заломлення світлових променів відбувається на межі прозорих середовищ, де світло поширюється з різними швидкостями

Закони відбивання світла:

1) падаючий і відбитий промені, а також перпендикуляр, опущений у точку падіння променя на поверхні розділу середовищ, лежать в одній площині;

2) кут падіння дорівнює куту відбивання ($\gamma = \beta$).

Закони заломлення світла:

1) падаючий і заломлений промені, а також перпендикуляр до поверхні розділу середовищ, опущений у точку падіння променя, лежать в одній площині;

2) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною сталою, що залежить лише від оптичних властивостей цих середовищ; це відносний показник заломлення другого середовища відносно першого:

$$n_{2,1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Відносний показник заломлення може бути як більшим, так і меншим від одиниці: $n_{2,1} > 1$ (мал. 4.25, а), $n_{2,1} < 1$ (мал. 4.25, б).

З найбільшою швидкістю поширюється світло у вакуумі:

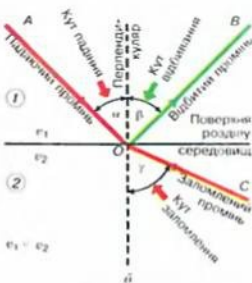
$$c \approx 300\,000 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Практично такою самою є швидкість поширення світла у повітрі. У всіх інших речовинах швидкість поширення світла менша.

Якщо у випадку $n_{2,1} > 1$ першим середовищем є вакуум (або повітря), то $n_{2,1} = n$. Цей показник називають абсолютним показником заломлення для другого середовища:

$$n_2 = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v_2}.$$

Абсолютний показник заломлення завжди більший від одиниці. Бачимо, що $n_{2,1} =$



Мал. 4.25. Заломлення світла на поверхні розділу двох середовищ, швидкість поширення світла в яких різна

$= \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2}$, де n_2 і n_1 — абсолютні показники

заломлення другого і першого середовищ.

У геометричній оптиці, яку ми тут розглядаємо, справджується правило оборотності променів: якщо промінь світла спрямувати у напрямку, протилежному до напрямку відбитого чи заломленого променя, то такий промінь піде у напрямку, протилежному до напрямку падаючого променя.

Цікаве явище можна спостерігати під час поширення світла з середовища з більшою оптичною густиною у середовище з меншою оптичною густиною (див. мал. 4.25, б). Якщо поступово збільшувати кут падіння α , то при певному його значенні (зрозуміло, меншому за 90°) кут заломлення дорівнюватиме 90° . При дальшому збільшенні кута падіння падаючий промінь уже буде відбиватися у те саме середовище, звідки поширювалося світло. Це явище дістало назву повного відбивання.

Якщо у цьому випадку другим середовищем є вакуум (або повітря), то для граничного кута падіння α_0 буде $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$, де n — абсолютний показник заломлення першого середовища ($\sin 90^\circ = 1$). При кутах падіння більших від α_0 світло за межі середовища не заломлюється.

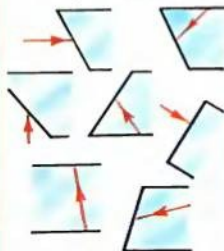
Якщо абсолютний показник заломлення першого середовища більший від абсолютного показника заломлення другого середовища, то перше середовище має більшу оптичну густину, ніж друге (поняття оптичної густини не має нічого спільного з поняттям густини речовини)

Коли кут заломлення дорівнює 90° , то відбувається повне відбивання

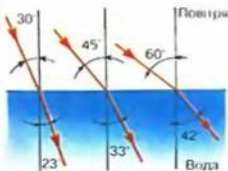
- ?
1. За яких умов швидкість поширення світла є максимально можливою в природі? Чому вона дорівнює?
 - 2. Чим зумовлене заломлення світла на межі двох прозорих середовищ?
 3. Що таке відносний показник заломлення? Яких значень він може набувати?
 4. Що таке абсолютний показник заломлення? Яких значень він може набувати?
 5. Як можна визначити абсолютний і відносний показники заломлення?

ВПРАВА 27

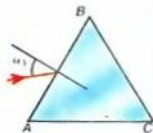
1. Для кожного випадку, наведеного на мал. 4.26, накресліть хід заломлених променів (скляні тіла перебувають у повітрі).
2. Визначте абсолютний показник заломлення для води за мал. 4.27.
3. Накресліть хід заломлених променів у призмі (мал. 4.28).



Мал. 4.26



Мал. 4.27



Мал. 4.28

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

Визначення показників заломлення світла для скла і води

Мета: навчитися експериментально визначати показники заломлення світла у склі та воді.

Обладнання: плоскопаралельна пластинка чи кілька покладених одна на одну пластинок зі звичайного скла, з'єднаних за допомогою клейкої стрічки; аркуш паперу (краще в клітинку); картон або аркуш паперу, що не швидко намокає у воді; склянка з водою; креслярські інструменти; лінійка з міліметровими поділками; транспортир.

Вказівки до роботи

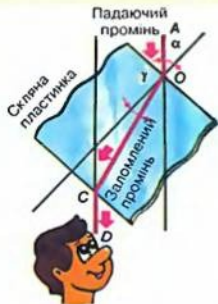
Одним з найпростіших способів визначення показника заломлення скла відносно повітря (наближено абсолютного) є спосіб з використанням плоскопаралель-

ної пластинки. Цей спосіб не потребує затемнення кабінету та виділення вузького пучка світлових променів.

Виконання роботи

1. На аркуші паперу проведіть дві паралельні лінії на відстані 1—1,5 см одна від одної (мал. 4.29). Покладіть на аркуш плоскопаралельну скляну пластинку або кілька пластинок, складених у купку.

Повертайте пластинку доти, доки промінь AO не здаватиметься



Мал. 4.29

продовження променя CD , що вийшов з пластинки (ліва лінія на мал. 4.29).

Окресліть положення паралельних боків пластинки і покажіть у точці падіння O кути падіння α і заломлення γ . За таблицями чи за допомогою мікрокалькулятора знайдіть значення синусів цих кутів і обчисліть значення показника заломлення:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}.$$

У разі ретельного виконання креслень і вимірювань за цим способом ви отримаєте добрі результати.

2. Найпростіше знайти показник заломлення води можна так. На аркуші картону чи цупкого паперу, що не швидко намокає у воді, накресліть коло зі взаємно перпендикулярними діаметрами (мал. 4.30). Відразу побудуйте промінь EO . Занурте малюнок у відповідну посудину з водою так, щоб діаметр AB збігся з поверхнею води. Тепер спостерігайте, в



Мал. 4.30

якій точці промінь перетинає коло (точка F), і зробить позначку.

Вийміть малюнок з води, просушіть його і будуйте промінь OF . Тепер скористайтесь властивістю оборотності променів. Промінь, пущений у напрямку FO , заломиться у напрямку OE .

Показник заломлення води відносно повітря (наближено до вакууму) становитиме

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}.$$

Варіанти додаткового завдання

1. Визначте показник заломлення даного скла іншими способами, які вам відомі чи запропоновані учителем.

2. Визначте показники заломлення світла для інших рідин (олія, розчин солі тощо).

§ 55. ЛІНЗИ. ЗОБРАЖЕННЯ, ЯКІ ДАЮТЬ ЛІНЗИ

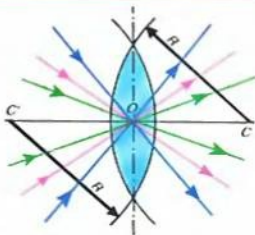
Основними деталями оптичних приладів є лінзи. В оптиці найчастіше зустрічаються сферичні лінзи, заломлюючі поверхні яких є частинами сфер чи сфер і площин.

Розглянемо проходження променів через тонку двопоуклу лінзу, обмежену двома сферичними поверхнями радіусом R (мал. 4.31).

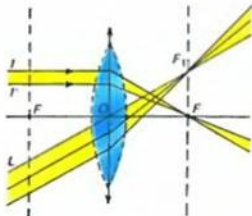
Будь-який промінь, що проходить через центр O лінзи, не змінює напрямку свого поширення, тобто лінзою він не заломлюється. Тому точка O називається оптичним центром лінзи, а будь-яка пряма, що проходить через центр, називається **оптичною віссю** лінзи. Отже, лінза має безліч оптичних осей, але серед них виділяють так звану **головну**, яка проходить через геометричні центри сферичних поверхонь, що утворюють лінзу (пряма CC). Решту оптичних осей називають **побічними**.

Розглянемо проходження паралельних світлових променів через тонку опуклу лінзу зі скла, що перебуває в повітрі (оптична густина скла більша за оптичну густина повітря).

Пучок променів II' (мал. 4.32) спрямуємо паралельно до головної оптичної осі. Після проходження через лінзу ці промені зберуться в точці F , що лежить на головній оптичній осі і називається **головним фокусом** лінзи.



Мал. 4.31. Хід променів через тонку двопоуклу лінзу



Мал. 4.32. Фокуси лінзи

Світлові промені промені через лінзу можна пропускати у двох напрямках, тому лінза має два головні фокуси, симетрично розміщені відносно оптичного центра лінзи. Відстань від оптичного центра лінзи O до одного з головних фокусів F називають *головною фокусною відстанню* лінзи (відрізок OF), часто цю відстань позначають просто F .

Лінзи, що перетворюють пучок паралельних променів у збіжний і збирають його в одну точку, називаються *збиральними лінзами*. У розглянутому випадку ми мали справу зі збиральною лінзою. Позначають збиральні лінзи стрілкою, як показано на мал. 4.32

На оправах лінз, об'єктивів зазначають їх фокусну відстань у метрах, сантиметрах чи міліметрах.

Для характеристики лінз застосовують також величину, що називається **оптичною силою**.

Оптичну силу лінз вимірюють як відношення одиниці до фокусної відстані у метрах: $D = \frac{1}{F}$. Одиницею оптичної сили є

діоптрія (дптр) — це оптична сила лінзи, фокусна відстань якої становить 1 м.

Якщо на лінзу спрямувати пучок світлових променів, паралельних побічній оптичній осі L (мал. 4.32), то ці промені зберуться в одній точці, що лежить у площині, яка проходить через головний фокус і перпендикулярна до головної оптичної осі лінзи. Ця точка F_1 називається **побічним фокусом лінзи**, а розглянута площина — **фокальною площиною**.

Кожна лінза має дві фокальні площини, з обох боків від лінзи, і безліч побічних фокусів. Якщо відомі точки і площини лінзи та напрямки проходження променів через них, можна побудувати зображення предметів, одержаних за допомогою цих лінз.

Одна й та сама лінза за різних умов може бути як збиральною, так і розсіювальною. Так, скляна опукла лінза у повітрі є збиральною, а якщо її занурити в рідину, абсолютний показник заломлення якої більший від абсолютного показника заломлення даного сорту скла, то вона буде розсіювальною. Коли ж показники заломлення матеріалу лінзи і рідини, в яку вона опущена, однакові, то лінза взагалі не є лінзою і променів вона не збирає і не розсіює

$$D = \frac{1}{F}$$

Кожна лінза має дві фокальні площини, з обох боків від лінзи, і безліч побічних фокусів

Нехай предмет умовно зображений стрілкою AB (мал. 4.33). Від кожної точки предмета поширюються світлові промені, частина яких потрапляє і на лінзу.

Розглянемо проходження через лінзу променів, що вийшли з верхньої точки предмета A і пройшли через лінзу. Нехай промінь 1 поширюється паралельно до головної оптичної осі. Пройшовши через лінзу і заломившись у ній, цей промінь пройде через головний фокус лінзи F .

Промінь 2 проходить через оптичний центр O лінзи і тому свого напрямку поширення не змінює.

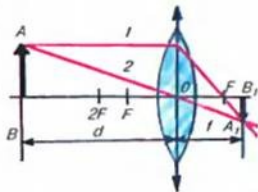
Отже, промені, що вийшли з точки A , проходять через лінзу і збираються нею у точці A_1 , тобто ця точка є зображенням точки A . Так само можна побудувати й зображення інших точок предмета, тільки воно буде зменшеним, дійсним (його можна одержати на екрані, фотоплівці тощо), оберненим. Таке зображення у більшості випадків одержують у фото- та кінокамерах, в оці тощо.

Але збиральні лінзи можуть давати і збільшені зображення предметів (мал. 4.34). Якщо предмет розмістити між фокусом і подвійним фокусом, то й розміри предмета AB будуть збільшені (A_1B_1). Зображення буде збільшене аналогічно до попереднього. Такі зображення одержують у проєкційній апаратурі та в інших оптичних пристроях.

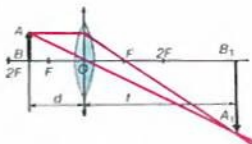
За допомогою геометричних побудов, враховуючи подібність трикутників, досить просто можна одержати так звану формулу лінзи, яка пов'язує між собою фокусну відстань лінзи F чи оптичну силу D з відстанями від предмета до лінзи d та від лінзи до зображення f .

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d},$$

де всі величини вимірюються в метрах, а оптична сила лінзи — у діоптріях. Коли ж у



Мал. 4.33. Одержання зменшеного зображення за допомогою лінзи



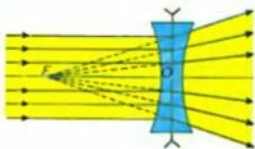
Мал. 4.34. Одержання збільшеного зображення за допомогою лінзи

Подвійний фокус — точка, що розміщена на відстані від центра лінзи $2OF$ або $2F$

задачах оптична сила лінзи відсутня, то F , d і f можна вимірювати у будь-яких одиницях довжини, але обов'язково однакових.

Увігнута скляна лінза у повітрі є розсіювальною (мал. 4.35). Якщо на розсіювальну лінзу спрямувати паралельний пучок променів паралельно до її головної оптичної осі, то лінза ці промені розсіюватиме, але у спостерігача, що дивиться на розсіювані промені у напрямку лінзи, створюватиметься враження, що промені виходять з точки F зліва від лінзи. Ця точка називається **уявним головним фокусом** розсіювальної лінзи. В розсіювальній лінзі таких фокусів два; існує ще безліч побічних фокусів, але всі вони уявні і створюють дві уявні фокальні площини.

Побудова зображень у розсіювальних лінзах здійснюється за тими самими правилами, що й у збиральних, але ці зображення завжди уявні і зменшені.



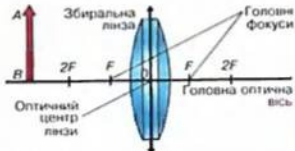
Мал. 4.35. Уявний головний фокус розсіювальної лінзи

Усі розглянуті лінзи утворювалися сферичними поверхнями або площинами спільно із сферичними поверхнями. Проте існують лінзи й інших типів, наприклад циліндричні. Так, пробірка з водою в повітрі є збиральною циліндричною лінзою, а така сама пробірка з повітрям у воді вже є розсіювальною лінзою

- ?
1. Що таке лінза? Які її властивості?
 2. Що таке головна оптична вісь лінзи?
 3. Що таке головний фокус лінзи та головна фокусна відстань?
 4. Що таке побічні оптичні осі лінзи, побічні фокуси, фокальні площини?
 5. Що можна визначити за формулою лінзи?
 6. Чи може бути одна й та сама лінза і збиральною, і розсіювальною?

ВПРАВА 28

1. Побудуйте зображення предмета AB , використовуючи мал. 4.36. За допомогою яких відомих вам приладів отримують такі зображення?
2. За мал. 4.37—4.39 знайдіть побудовою положення оптичного центра збиральної лінзи та її головних фокусів.



Мал. 4.36



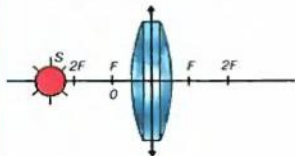
Світна точка

Головна оптична вісь лінзи

Зображення світної точки 

Мал. 4.37

3. За мал. 4.40 знайдіть побудовою зображення світної точки S .



Мал. 4.40

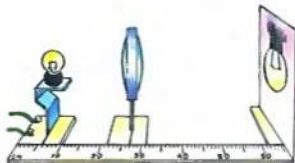
4. Визначте за мал. 4.41: а) побудовою фокусну відстань лінзи, її оптичну силу; б) фокусну відстань лінзи за її формулою; в) у скільки разів зображення більше від предмета? Порівняйте одержане збільшення з відношенням відстані між лінзою і зображенням до відстані між лінзою і предметом. Зробіть висновки.



Мал. 4.38



Мал. 4.39



Мал. 4.41

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

Одержання зображень за допомогою збиральної лінзи та визначення її фокусної відстані й оптичної сили

Мета: навчитися отримувати зменшені та збільшені зображення предметів за допомогою збиральної лінзи, через геометричні побудови визначати її фокусну відстань, визначати оптичну силу лінзи, користуватися формулою лінзи.

Обладнання: збиральна лінза на підставці; лампа для кишенькового ліхтарика на підставці з джерелом живлення або свічка; білий екран; вимірювальна лінійка.

Виконання роботи

1. Одержіть на екрані чітке зменшене зображення джерела світла. Виміряйте в метрах відстань d від джерела світла до лінзи та відстань f від лінзи до екрана.

Побудовою з дотриманням масштабу знайдіть положення головних фокусів лінзи і визначте фокусну відстань лінзи та її оптичну силу.

Визначте фокусну відстань F та оптичну силу D лінзи за формулою

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$$

При визначенні оптичної сили лінзи фокусну (і всі інші) відстань слід брати в метрах, лише тоді оптичну силу можна визначити у діоптріях.

2. Одержіть на екрані збільшене зображення джерела світла і виконайте всі дії, що описані у пункті 1.

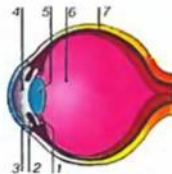
3. Установіть, де необхідно розташувати джерело світла, щоб на екрані було його зображення такого самого розміру, як і джерело. Перевірте свій висновок на досліді.

§ 56. ОКО І ЗІР

Для людини найважливішим органом чуття є очі, які з фізичної точки зору є оптичними системами або, умовно, приладами. Очі мають усі хребетні і деякі безхребетні тварини.

У людини і вищих хребетних тварин око складається (мал. 4.42) з пласне ока (очне яблуко) та допоміжних органів, якими є повіки, органи, що виробляють сльози, м'язи, що рухають очі.

Очне яблуко за допомогою зорового нерва з'єднане з головним мозком. Воно має форму не зовсім правильної кулі, що складається з ядра і капсули. Ядро поділяється на дві частини. В меншій передній частині 4 є передня і задня камери, заповнені водянистою вологою, і кришталик 5. Більша задня частина 6 вміщує склоподібне тіло.



Мал. 4.42. Будова ока

Капсула складається з трьох оболонок: зовнішньої білкової, або склери, яка спереду переходить у рогівку 3; середньої — судинної оболонки, яка спереду переходить у райдужну оболонку з отвором у центрі 2 — зіницею; внутрішньої — сітківки 7.

Зображення утворюється на сітківці (мал. 4.43), яка є світлочутливою ділянкою ока. Тут є світлочутливі елементи — колбочки і палички.

Місце найкращого бачення, що розташоване над виходом зорового нерва, називається жовтою плямою, а ділянка сітківки, де зоровий нерв виходить з ока, — це так звана сліпа пляма.

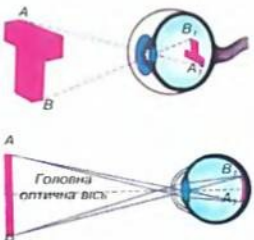
Кришталік є прозорим пружним тілом, що має форму двоопуклої лінзи. Показник заломлення речовини кришталіка 1,45 (як у легких сортів скла). Кришталік утримується м'язами (див. мал. 4.42, поз. 1) як оправою. Ці м'язи можуть змінювати опуклість кришталіка, тобто його фокусну відстань, для одержання на сітківці чіткого зображення тих предметів, що розглядаються.

Водяниста волога і склоподібне тіло в оці мають показник заломлення майже такий самий, як і у воді ($4/3 = 1,33...$).

Світло, що потрапляє в око, заломлюється на передній поверхні ока, в рогівці, кришталіку і склоподібному тілі, завдяки чому на сітківці одержується дійсне, зменшене, перевернуте зображення розглядуваних предметів.

Світло, що утворює зображення, є подразником закінчення зорового нерва, що міститься в сітківці. Подразнення за допомогою нервових волокон передаються в мозок, і людина одержує зорове відчуття, бачить предмети. Мозок «перевертає» зображення, тому предмет сприймається як прямий.

Рогівка, водяниста волога, кришталік і склоподібне тіло утворюють оптичну систему ока, що загалом діє як збиральна двоопукла лінза



Мал. 4.43. Одержання зображень на сітківці ока

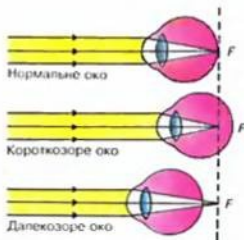
Ми бачимо предмети чіткими, хоч вони можуть перебувати на різних відстанях від ока. За допомогою спеціальних м'язів може змінюватись фокусна відстань оптичної системи ока, що й дає можливість «настроюватись на різкість».

Властивість ока пристосовуватися до розглядання предметів, що перебувають на різних відстанях, називається *акомодацією* (від латинського слова, що означає пристосування). Межі акомодатії простягаються від нескінченності до 12–15 см для нормального ока. Відстань найкращого бачення для нормального ока близько 25 см, при цьому око не напружується і не так швидко стомлюється.

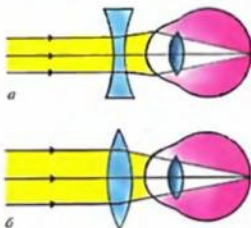
Розглядання предметів за допомогою двох очей дає можливість до певної міри розширювати поле зору, а також оцінювати, які предмети розташовані далі, а які ближче від нас. Завдяки двом очам ми також бачимо предмети об'ємними.

Досить часто спостерігаються такі недоліки ока, як короткозорість і далекозорість. Чітке зображення розглядуваних предметів повинно одержуватись на сітківці ока. Але за різних причин оптична система ока може дещо змінитися — зменшиться або збільшиться її фокусна відстань (мал. 4.44), що й призводить до виникнення короткозорості й далекозорості.

Такі недоліки очей можна усунути за допомогою лінз (окулярів). У короткозорого ока чітке зображення утворюється перед сітківкою. Тому для одержання чіткого зображення на сітківці перед оком ставлять розсіювальну лінзу, і фокусна відстань ока зростає (мал. 4.45, а). Для далекозорого ока фокусну відстань, навпаки, необхідно зменшити, тому перед оком ставлять збиральну лінзу з відповідною оптичною силою (мал. 4.45, б).



Мал. 4.44. Недоліки зору



Мал. 4.45. Використання лінз для виправлення недоліків зору

- ?
1. За схемою будови ока розкажіть про його склад та призначення окремих частин. Скористайтесь вивченням матеріалом з біології про око.
 2. Як і які зображення утворюються на сітківці ока?
 3. Чому при різних відстанях від ока до предметів їх зображення на сітківці одержуються чіткими?
 4. Які основні недоліки зору ви знаєте, чим вони пояснюються? Як ці недоліки усуваються?
 5. Оптична сила лінз може бути додатною і від'ємною. Які з лінз можна використати для усунення короткозорості, далекозорості?

ВПРАВА 29

1. Око крокодила акомодується (пристосовується до бачення на різних відстанях) не у разі зміни кривизни кришталика, а у разі його переміщення далі або ближче від сітківки. Куди рухається кришталик при наближенні крокодила до предмета?
2. Чи змінюється фокусна відстань оптичної системи ока риби, якщо вона висовує голову над водою? Якщо змінюється, то як?
3. На окулярах указують оптичну силу використаних лінз: +2 дптр; -0,25 дптр; -4 дптр; +1,5 дптр тощо. Які недоліки зору усувають такі окуляри? Яку фокусну відстань має кожна з таких лінз?
4. Визначте оптичну силу лінз будь-яких окулярів, що є у вас удома. Встановіть, які з лінз є збиральними, а які — розсіювальними.

§ 57. ФОТОГРАФІЯ І ФОТОАПАРАТ

Нині важко собі уявити життя без фотографії. Вона дає можливість зберегти для нащадків історичні події, допомагає у виготовленні мікроелектронних схем, є невід'ємною складовою наукових досліджень в археології, біології, медицині, астрономії тощо.

Сучасний стан фотографії завдячує в основному успіхам у розвитку фізики і хімії.

Першим апаратом, за допомогою якого одержували зображення різних предметів, була камера-обскура (темна камера).

Явище, покладене в основу дії камери-обскури, було відоме досить давно, про нього писав ще Арістотель. Якщо в темній шторі, що завішує вікна кімнати, зробити невеликий отвір, на стіні проти отвору можна побачити зображення предметів, що знаходяться на вулиці. За допомогою камер-обскур проводили астрономічні спостереження, виконували малюнки. Пізніше в камерах-обскурах почали застосовувати збиральні лінзи, що дало можливість використовувати їх як фотографічні апарати.

Відкриття фотографії пов'язують з іменами трьох винахідників: Жозефа Нісєфора Ньєса (1765—1833), Луї Жака Манде Дагера (1787—1851) та Вільяма Генрі Фокса Талбота (1800—1877).

Н. Ньєс народився у Франції. Разом із старшим братом Клодом він розробив *геліографію*. У цьому процесі зображення, що утворювалось за допомогою камери-обскури, фіксувалось на мідних посріблених пластинках, покритих шаром асфальту, розчиненого в лавандовій олії.

Л. Дагер народився також у Франції. З 1829 р. він співпрацював з Н. Ньєсом над удосконаленням геліографії. Найважливішим досягненням Л. Дагера стало відкриття світлочутливості йодистого срібла і властивості пари ртуті проявляти приховане зображення на йодистосрібній пластинці. Такий спосіб фотографування назвали *дагеротипією*. Знімки, виготовлені за цим способом, були високоякісними, але з них не можна було виготовити копій.

В. Талботу, вихідцеві з англійської сім'ї, вдалося здійснити двоступеневий негативно-позитивний процес, що дало можливість розмножувати знімки у будь-якій кількості.

Вважається, що основи сучасної фотографії створені у 1839 р.

У журналі за 1914 р. «Природа і люди» (№ 3) була опублікована стаття блискучого популяризатора науки Я. І. Перельмана «Як слід розглядати фотознімки?», де Яків Ісидорович писав: «...людей, що вміють правильно глянути на фотознімок, зустрічаєш набагато рідше, ніж тих, що вміють його виготовити...»

Для того, щоб фотознімок при розгляданні створював враження глибини і об'єму, необхідно розмістити його певним чином відносно нашого ока... Фотознімок фіксує перспективний вигляд, який здався б нашому оку (одному оку), якби ми помістили його на місце об'єктива фотоапарата. Звідси прямий висновок: розглядати знімок треба лише одним оком; тримати знімок на правильній відстані від ока».

А ще краще розглядати знімки за допомогою лупи (одним оком). Спробуйте.

У 1877 р. з ініціативи Дмитра Івановича Менделєєва було створено товариство, що об'єднало кращих фотографів того часу. Вчений назвав фотографію «другим зором людини».

Непогані фотографії, так звані фотограми (мал. 4.46), можна виготовити без фотоапарата. Для їх виготовлення слід мати лише чорно-білий фотопапір, проявник, фіксаж, воду, червоне і біле світло.

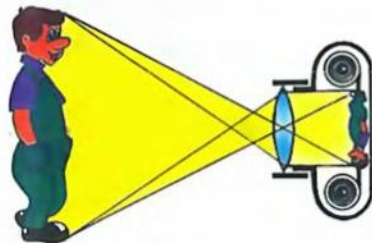
При червоному світлі на аркуш чорно-білого фотопаперу, що нечутливий до такого світла, кладуть напівпрозорий предмет. На 1—2 секунди вмикають біле світло і знову при червоному світлі обробляють фотопапір звичайним способом. На території нашої країни такі фотограми були виготовлені вже в 1839 р., коли стали відомими відкриття згаданих вище вчених.

Сьогодні переважну більшість фотознімків виготовляють за допомогою спеціальних приладів — фотоапаратів, збільшувачів тощо.

Схема найпростішого фотоапарата наведена на мал. 4.47. Об'єктивом у такому апараті є збірна лінза, що дає на фотоплівці дійсне і перевернуте зображення. Наведення на різкість (одержання на плівці чіткого



Мал. 4.46. Фотограма листа і плоза



Мал. 4.47. Оптична схема найпростішого фотоапарата

На плівці можна одержати зменшене зображення предмета, якщо він розташований від об'єктива далі, ніж подвійна фокусна відстань об'єктива. Коли ж необхідно одержати знімок предмета у натуральну величину, то цей предмет повинен бути розміщений на подвійній фокусній відстані. А коли потрібно одержати зображення у збільшеному розмірі, то предмет розміщують між фокусом і подвійним фокусом. Якщо конструкція апарата не дає можливості це зробити, то між камерою апарата і об'єктивом ставлять здовжувальні кільця чи інші пристрої

зображення предмета) здійснюється зміною відстані об'єктива від фотоплівки.

Сучасні фотоапарати мають складну будову (мал. 4.48). Тут є об'єктив 1, який може складатися зі значної кількості лінз. Це забезпечує одержання чітких і точних зоб-



Мал. 4.48. Будова сучасного фотоапарата

ражень, оскільки одна лінза має чимало недоліків і дає не зовсім якісні зображення.

В об'єктив вмонтовано діафрагму 2, за допомогою якої регулюється кількість світла, що потрапляє на фотоплівку 10. Таку саму функцію виконує зіниця в очі.

Між об'єктивом і плівкою повинен стояти так званий затвор, який пропускає світло до плівки лише в момент фотографування (експозиції).

У наведеному фотоапараті є також фотометр 3, що дає можливість точно дозувати кількість світла, яке потрапляє на плівку. Концентратор світла 4, розподільник світла 5, пентапризма 6, лупа 7, лінза з матовою поверхнею 8, поворотне дзеркало 9 дають можливість вибирати кадр для фотографування й наводити на різкість. Пово-

Для поліпшення зображень в оптичному приладі використовуються об'єктиви, конденсори тощо, які виготовляють із значної кількості лінз



Мал. 4.49. Фотоапарат «Київ» (напис на об'єктиві $F = 8$ см)

росте дзеркало в момент фотографування стає в горизонтальне положення, відкриваючи шлях світлу до плівки. Сьогодні існують фотоапарати, де значна кількість операцій під час фотографування виконується автоматично.

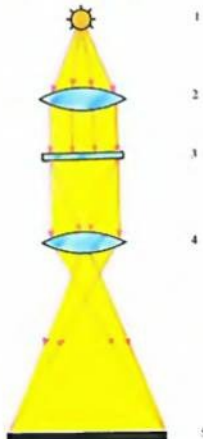
На мал. 4.49 показано один із кращих апаратів, виготовлений українськими підприємствами, що використовується в професійній фотографії.

У багатьох випадках площа кадра на фотоплівці фотоапарата невелика, а фотознімки бажано мати значних розмірів. Тому при друкуванні фотознімків доводиться користуватися так званими фотозбільшувачами, що дають збільшені зображення негатива на фотопапері. Спрощена оптична схема фотозбільшувача зображена на мал. 4.50.

Тут є джерело світла 1 — це, в основному, електрична лампа розжарювання порівняно невеликої потужності. Джерело світла розмішують у фокусі лінзи 2 (конденсора), з якої вже виходить паралельний пучок світла, що рівномірно освітлює негатив 3. Лінза 4 (об'єктив) проєктує зображення негатива на фотопапері 5. Фотопапір кладеться на фотозбільшувач при червоному світлі.

Потім червоний світлофільтр забирають під об'єктива 4 (на малюнку не показано) і на фотопапір потрапляє зображення негатива при звичайному освітленні. Час експозиції підбирають практично залежно від конкретних умов. Обробляють фотопапір у проявнику, промивають, фіксують, знову промивають, висушують або гляncють — і знімок готовий.

У 1840 р. уперше сфотографовано Місяць, а в 1959 р. радянська автоматична станція сфотографувала зворотний бік Місяця, якого з Землі ніколи людина не бачила. У вересні 1968 р. автоматична станція «Зонд-5» сфотографувала нашу планету з

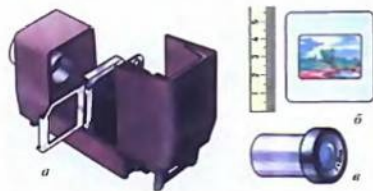


Мал. 4.50. Спрощена оптична схема фотозбільшувача

У 1840 р. уперше сфотографовано Місяць, а в 1959 р. радянська автоматична станція сфотографувала зворотний бік Місяця, якого з Землі ніколи людина не бачила

космосу. На мал. 4.51 показаний фотознімок внутрішньої частини кратера Копернік на Місяці, зроблений апаратом, виготовленим німецькими вченими.

Таку саму оптичну схему, як у збільшувача, мають практично всі проєкційні апарати: діапроектори, кінопроекційні апарати тощо. На мал. 4.52, а показано простий і зручний діапроектор «Етюд», що випускається в Харкові. Для поліпшення зобра-



Мал. 4.52. Діапроектор «Етюд» (напис на об'єктиві $F = 80$ мм) жень в оптичних приладах використовують об'єктиви, конденсори тощо, які виготовляються зі значної кількості лінз.



Мал. 4.51. Фотознімок внутрішньої частини місячного кратера

- ?
1. Що спільного в оптичних системах ока та фотоапарата?
 2. Як здійснюється наведення «на різкість» в оці людини і фотоапараті?
 3. Розкажіть про оптичну систему збільшувача (проекційного апарата).
 4. На плівці фотоапарата одержали зображення квітки в натуральну величину, коли відстань від об'єктива до квітки була 10 см. Яка фокусна відстань об'єктива?

ВПРАВА 30

1. За мал. 4.49: а) визначте оптичну силу об'єктива фотоапарата; б) побудуйте в масштабі зображення предмета, яке дає об'єктив фотоапарата; в) визначте побудовою відстань від об'єктива до плівки; г) визначте, у скільки разів розміри зображення менші за розміри предмета.

2. Як потрібно встановити діапозитив у рамку проєктора (мал. 4.52, б), щоб правильно спроектувати зображення на екран?
3. Які будуть розміри зображення на екрані, якщо для проєкції використовують наведений об'єктив (мал. 4.52, в) і встановлюють проєктор на відстані 2 м від екрана?

§ 58. ЛУПА

У разі необхідності під час розглядання яких-небудь дрібних предметів чи їхніх деталей доводиться їх наближати до ока, щоб зображення на сітківці ставало все більшим. Але це вимагає значного напруження ока при акомодациї, а при малих відстанях акомодация взагалі стає неможливою.

У таких випадках перед оком розміщують короткофокусну збиральну лінзу, яку називають **лупою**. Предмет *аа* розміщують між лінзою і її головним фокусом (мал. 4.53). Оком розглядають його уявне зображення *АВ*.

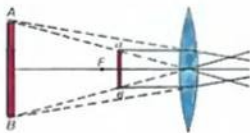
Положення цього зображення і його розміри залежать від відстані між предметом і лупою. Звичайно предмет розташовують так, щоб його зображення було на відстані найкращого бачення, тобто близько 25 см від ока.

Збільшення лупи називають відношення розміру зображення *АВ* до розміру предмета *аа* саме для того випадку, коли відстань зображення від ока дорівнює 25 см.

Оскільки лупу розміщують близько до ока, а предмет — близько до головного фокуса лінзи, то збільшення лупи наближено дорівнює відношенню відстані найкращого бачення (25 см) до фокусної відстані лупи. Так, наприклад, лінза з фокусною відстанню 2,5 см дає збільшення приблизно у 10 разів.

Лупи можуть складатися й з кількох лінз для запобігання їхніх оптичних недоліків.

Лупа — це короткофокусна збиральна лінза



Мал. 4.53. Зображення предмета через лупу

ВПРАВА 31

Знайдіть удома збиральні лінзи, використайте їх як лупи і для кожного випадку визначте їх збільшення.

§ 59. МІКРОСКОП

При потребі розглядати предмети із значним збільшенням використовують оптичні мікроскопи (збільшення від 20 до 2000 разів). Оптична схема найпростішого мікроскопа складається з короткофокусного об'єктива та окуляра (тобто лупи).

Розглядуваний предмет розміщують так, щоб він був від об'єктива на відстані дещо більшій від фокусної відстані об'єктива. При цьому об'єктив дає зображення предмета за подвійною фокусною відстанню. Це зображення, яке розглядають за допомогою окуляра, буде дійсним, оберненим і збільшеним.

Збільшення мікроскопа залежить від властивостей об'єктива й окуляра та від розташування предмета. Але для даного об'єктива ця відстань змінюється в незначних межах. Тому для об'єктива d є практично однаковим, що на ньому і вказується. А збільшення окуляра визначається як для лупи при відстані найкращого бачення 25 см.

Якщо збільшення об'єктива і окуляра відомі, то збільшення мікроскопа визначається як добуток цих двох збільшень. Звичайно, об'єктиви й окуляри роблять зі значної кількості лінз із різними властивостями

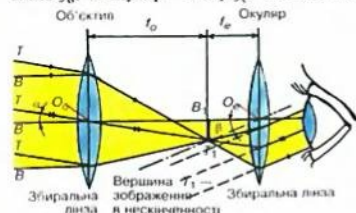
ВПРАВА 32

1. Накресліть схему оптичної системи мікроскопа відповідно до опису в цьому параграфі.
2. Розгляньте мікроскоп, що є у фізичному чи біологічному кабінеті або у вас удома. За позначками на його об'єктиві й окулярі визначте збільшення. Якщо об'єктивів і окулярів у нього кілька, то визначте збільшення для кожної з можливих комбінацій.

Для розглядання віддалених предметів, у тому числі небесних тіл, були розроблені так звані зорові труби або телескопи. Є два основні типи телескопів: телескопи-рефрактори (на основі лінз) і телескопи-рефлектори (на основі дзеркал).

Найпростіший телескоп, як і мікроскоп, має об'єктив і окуляр, але на відміну від мікроскопа об'єктив телескопа має велику фокусну відстань, а окуляр — малу.

Телескоп Кеплера складається з двох збиральних лінз (мал. 4.54). У такому телескопі об'єктив має велику фокусну відстань f_o , а окуляр — малу f_e . Оскільки кос-



Мал. 4.54. Зображення через телескоп Кеплера

мічні тіла перебувають на дуже великих відстанях від нас, то промені від них ідуть паралельним пучком і збираються об'єктивом практично у фокальній площині, де одержується дійсне, обернене і зменшене зображення розглядуваного об'єкта: точка T_1 є зображенням точки T , яка міститься у верхній частині об'єкта. Це зображення розглядається через окуляр як через звичайну лупу, тобто бачимо розглядуваний об'єкт під більшим кутом. Кутове збільшення телескопа — це відношення кута β до кута α , яке практично дорівнює відно-

Найпростіший телескоп, як і мікроскоп, має об'єктив і окуляр, але на відміну від мікроскопа об'єктив телескопа має велику фокусну відстань, а окуляр — малу

Оскільки космічні тіла перебувають на дуже великих відстанях від нас, то промені від них ідуть паралельним пучком і збираються об'єктивом практично у фокальній площині, де одержується дійсне, обернене і зменшене зображення розглядуваного об'єкта

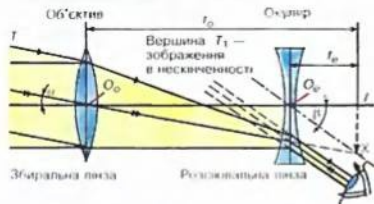
шенню фокусних відстаней ($\frac{f_o}{f_e}$) об'єктива

й окуляра (за допомогою ока ми бачимо об'єкт під кутом α , а за допомогою телескопа — під кутом β).

Зображення в телескопі Кеплера перевернуто. Щоб зробити його прямим, можна скористатись додатковою лінзою, але при цьому труба телескопа значно здовжується, що не завжди зручно.

Пряме зображення можна отримати за допомогою телескопа Галілея (мал. 4.55). На відміну від телескопа Кеплера в цьому телескопі окуляром є розсіювальна лінза, труба коротша. Об'єктивом в обох телескопах є довгофокусна лінза.

Об'єктив давав би перевернуте зображення у фокальній площині, але світло розсіюється окуляром, збільшуючи при цьому кут



Мал. 4.55. Зображення через телескоп Галілея

зору. Окуляр розміщено так, що відстань $O_e I$ дорівнює $f_o - f_e$, а кутове збільшення $\frac{\beta}{\alpha}$, як і в попередньому випадку, — $\frac{f_o}{f_e}$.

На мал. 4.56 показано телескоп, за допомогою якого у січні 1610 р. Галілео Галілей зробив надзвичайно важливі відкрит-

Зображення в телескопі Кеплера перевернуто. Щоб зробити його прямим, можна скористатись додатковою лінзою

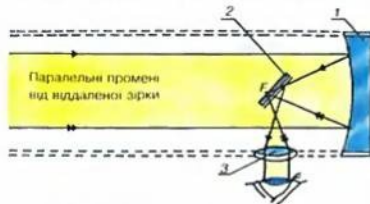


Мал. 4.56. Телескоп, яким користувався Галілей

тя. Він встановив, що «молочний», або «чумацький», шлях є скупченням величезної кількості зірок, а на Місяці є гори і кратери; відкрив супутники Юпітера тощо. На мал. 4.57 показаний власноручний малюнок Галілея, де Місяць зображений таким, яким він його побачив у свій телескоп.

У телескопі Кеплера зображення обернене. Оригінальний метод обернення зображення і скорочення довжини в телескопі Кеплера реалізовано в призматичному біноклі, де між довгофокусним об'єктивом і короткофокусним окуляром розташовано дві прямокутні призми. Це дало можливість бачити в такому біноклі прямі зображення предметів.

Телескоп-рефлектор системи Ньютона (мал. 4.58) складається з великого увігнутого (збирального) дзеркала-об'єктива 1, плоского дзеркала невеликих розмірів 2, що



Мал. 4.58. Зображення через телескоп-рефлектор системи Ньютона

повертає світлові промені до окуляра 3. Лінза окуляра дає можливість спостерігати зображення у плоскому дзеркалі. Увігнуте дзеркало тут великих розмірів, щоб якомога більше світла надходило для одержання кращого зображення.

Це дзеркало звичайно покривають сріблом або алюмінієм з лицьового боку, на від-



Мал. 4.57. Місяць. Власноручний малюнок Галілея

Оригінальний метод обернення зображення і скорочення довжини в телескопі Кеплера реалізовано в призматичному біноклі

міну від тих дзеркал, якими ми користуємося у повсякденному житті. Такі дзеркала можуть бути досить великими. Діаметр дзеркала телескопа-рефлектора обсерваторії в Маунт-Паломар (США) становить 5 м.

В оптичні прилади дивитися на об'єкти, що яскраво світяться, наприклад на Сонце, заборонено!

ВПРАВА 33

1. Виготовте телескоп Кеплера. Як об'єктив використайте довгофокусну лінзу, наприклад $f_o = 30$ см, а окуляр — короткофокусну, наприклад, $f_e = 2,5$ см). З цупкого паперу чи картону виготовте трубу, щоб лінзи були на відстані $30 \text{ см} + 2,5 \text{ см} = 32,5$ см. Визначте збільшення виготовленого вами телескопа.
2. Знайдіть дві збиральні лінзи, визначте їхні фокусні відстані і виготовте з них телескоп, розрахуйте його збільшення.
3. Виготовте телескоп Галілея, використавши збиральну і розсіювальну лінзи, наприклад для окулярів. Визначте його збільшення. Скористайтесь виготовленими приладами для розгляду віддалених предметів.

ГОЛОВНЕ В РОЗДІЛІ 4

1. Світло — електромагнітні хвилі, які на відміну від механічних хвиль (звук, хвилі на поверхні води тощо) поширюються й у вакуумі. Людина за допомогою органів зору бачить не всі електромагнітні хвилі. Радіохвилі, рентгенівські промені тощо людина не сприймає безпосередньо, а використовує для цього спеціальні пристрої. У ряді випадків світло поводить себе і як потік частинок — фотонів.
2. В однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно, але бувають і відхилення від прямолінійності.
3. У різних прозорих середовищах світло поширюється з різними швидкостями. З найбільшою швидкістю світло поширюється у вакуумі (дещо менше $300\,000$ км/с). Чим з меншою швидкістю поширюється світло в даному середовищі, тим більшу оптичну густину воно має (поняття оптичної густини не має нічого спільного з поняттям густини речовини).
4. Одна й та сама лінза за різних умов може бути як збиральною, так і розсіювальною. Так, скляна опукла лінза у повітрі є збиральною, а якщо її занурити в рідину, абсолютний показник заломлення світла якої більший від абсолютного показника заломлення даного сорту скла, то вона буде розсіювальною.

- Вправа 1. 1. а) не відбуватиметься; б) вода віддаватиме теплоту на нагрівання льоду; в) вода віддаватиме теплоту на плавлення льоду.
- Вправа 2. 1. Коефіцієнт об'ємного розширення скла має бути набагато меншим від коефіцієнта об'ємного розширення рідини.
2. Значення коефіцієнтів об'ємного розширення спирту і ртуті залежать від температури.
4*. $T = t + 273$.
- Вправа 3. 1. 0,64 %. 2. 0,3 %. 3. 2000 м³. 4. Довжина дроту зменшиться на 3 см.
- Вправа 6. 1. $135 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. 2. 0,4 кг. 3. Мідь ($c = 380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$). 4. 110 К. 5. 894 кДж.
- Вправа 7. 1. 8 МДж. 2. 40°C; 50,4 кДж. 3. 200 г. 4. 12°C.
- Вправа 8. 1. 370 кг. 2. 5,5 кг. 3. 14 г. 4. 41°C.
- Вправа 9. 1. 530 кДж. 2. 194 кДж. 3. 1200 кДж. 4. 0,275 кг. 5. 0,26 кг.
- Вправа 10. 1. 77,4 кДж. 2. 13 г. 3. 7,5°C. 4. Ні.
- Вправа 11. 1. 15 кг. 2. 0,3, або 30 %.
- Вправа 12. 2. 6 протонів і 6 нейтронів. 3. Йон, що має позитивний заряд.
- Вправа 15. 320 мА = 0,32 А; 0,32 Кл.
- Вправа 16. 2. $U = 4 \text{ В}$ — при перенесенні частинками, що створюють струм, заряду в 1 Кл виконувється робота 4 Дж; $I = 2 \text{ А}$ — за 1 с через поперечний переріз провідника переноситься заряд у 2 Кл.
- Вправа 17. 1. Довгий провідник має у 8 разів більший опір.
2. $112 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} = 1,12 \text{ Ом}$.
3. 151 Ом; коли спіраль плитки нагріється, то її опір стане більшим.
- Вправа 18. 1. 4,4 А. 2. 14 Ом. 3. Провідник А. 4. 8,3 Ом. 6. 0,0392 В; $0,0224 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.
- Вправа 20. 1. а) $I - S1, S3, S5$ — резистор R1; $S2, S5$ — резистор R2; 2 — $S1, S5$ — послідовно резистори R1 і R3 або $S2, S3, S4$ — послідовно R2 і R4; $J - S2, S4$ — послідовно з'єднані резистори R2, R3 і R4; 4 — $S1, S2, S3, S5$ — резистори R1 і R2 з'єднані паралельно; 5 — $S1, S2, S3, S4 - R1$ і R2 з'єднані паралельно, а R4 — послідовно з ними; 6 — $S1, S4, S5 - R1$ і послідовно з ним паралельно з'єднані R3 і R4; б) $I - 10 \text{ Ом}$; 2 — 20 Ом; $J - 30 \text{ Ом}$; 4 — 5 Ом; 5 і 6 — 15 Ом; в) див. 1, а і 1, б; г) 2 А (див. 1, а, 1, б і 1, в).
2. а) одна лампа — S2; дві лампи — S1 і S2; три лампи — S1, S2 і S3;
б) 0,28 А; 0,56 А; 0,84 А.

Вправа 21. 1. Якщо на лампі написано 2,5 В, 0,15 А, то 0,375 Вт; 337,5 Дж; 0,15 А і 16,7 Ом.

2. Вважаємо, що опір вольтметрів набагато більший від опору резисторів, а опір амперметра набагато менший, щоб їхніми опорами можна було нехтувати:

1. Усі вимикачі розімкнено або замкнено лише вимикач S1: $I = 0$; $U_1 = U_2 = 0$; $U_3 = 120$ В;

2. Замкнено лише вимикачі: а) S2: $I = 12$ А; $U_1 = 120$ В; $U_2 = U_3 = 0$; б) S3: $I = 4$ А; $U_1 = U_2 = U_3 = 40$ В; в) S1 і S2: $I = 24$ А; $U_1 = U_2 = 120$ В; $U_3 = 0$; г) S1, S2 і S3: $I = 36$ А; $U_1 = U_2 = U_3 = 120$ В.

3. Див. завдання 2: $I = 0$; 2 а) 1440 Вт = $1,440$ кВт; б) 480 Вт = $0,480$ кВт; в) $2,880$ кВт; г) $4,320$ кВт.

Вправа 22. 1. $900\,000$ Дж = 900 кДж = $0,9$ МДж.

2. а) провідники з'єднані послідовно. Сила струму в провідниках однакова, тому зручно скористатися формулою $Q = I^2 R t$. Оскільки розміри провідників однакові, то $R \sim \rho$. У даному випадку ρ нікеліну найбільше, тому в нікеліновому провіднику виділиться найбільша кількість теплоти; б) провідники приєднані до джерела паралельно, тому напруга на кожному з них однакова. Зручно скористатися формулою $Q = \frac{U^2}{R} t$. Найбільша кількість теплоти виділиться в тому провіднику, опір якого найменший. Оскільки $R \sim \rho$, то найбільша кількість теплоти виділиться в мідному провіднику, оскільки мідь має найменший питомий опір.

Вправа 23. Якщо на лампі є напис «60 Вт, 220 В», то ≈ 810 Ом; $\approx 0,27$ А; 2 А.

Вправа 27. 2. $\approx 1,3$.

Абсолютний показник заломлення світла 163
 Архальний стан речовини 14, 54
 Акомодация 174
 Ампер 95
 Ампер Андре 96
 Амперметр 96
 Атом 13, 54, 69, 70
 Банскавка 68
 Ват 122
 Ватметр 123
 Ват-секунда 123
 Випаровування 47, 58
 Відносний показник заломлення світла 163
 Внутрішня енергія тіла 14, 16, 22, 39
 Вольт 101
 Вольт Алессандро 101
 Вольтметр 101
 Гальберт Вільям 139
 Головна оптична вісь увігнутих і виступаючих дзеркал 160
 Головна оптична вісь лінзи 167
 Головний фокус дзеркала 160
 Головні фокуси лінзи 167
 Градус Цельсія 7
 Грім 68
 Двигун внутрішнього згоряння 64
 Демокрит 78
 Демпфер 146
 Джерела струму 87
 Джоуль 18, 25, 123
 Джоуль Джеймс 16, 125
 Дзеркальне і дифузне (розсіяне) відбивання світла 153
 Дослід Ерстед 85
 Елісон Томас Алва 127
 Електрика, електризція 69
 Електризація через вплив 83
 Електричне коло 89
 — поле 75, 76
 Електричний двигун 146, 147
 — струм 86
 Електромагніт 137, 138
 Електромагнітне реле 138
 Електрон 71, 72

Електроскоп, електрометр 73, 74
 Елементарні частинки 72, 73
 Ерстед Ганс-Христіан 85
 Закон Джоуля—Ленца 125
 — збереження енергії 38
 — Кулона 76
 — Ома 107
 Закони відбивання світла 156
 Запобіжники 128
 Заряд 71
 Зарядження і розрядження тіл 72
 Загрозлення Сонця і Місяця 152
 Йон 13, 79
 Йоффе Абрам 78
 Калориметр 29, 34
 Калорія 25
 Кішіни 50, 56
 Кількість теплоти 18, 24, 32, 55
 Коefіцієнт корисної дії (ККД) 61
 — лінійного розширення 11
 — об'ємного розширення 10
 Конвекція 20, 21
 Конденсація 48, 58
 Коротке замикання 128
 Кристалізація 42, 58
 Кулон 78, 95
 Кулон Шарль 76
 Лампа розжарювання 128
 Ленні Еміль 125
 Луна 181
 Магнітні взаємодії, магнітне поле 131
 Молекула 13, 54, 69
 Напруга 100
 Напрямок струму 92
 Нейтрон 80
 Ом 105
 Ом Георг 108
 Опір 104
 Оптична сила лінзи 168
 Оптична вісь лінзи 167
 Перископ 160
 Питома теплоємність речовини 27, 29
 — теплота згоряння палива 36
 — теплота пароутворення 47, 48

— теплота плавлення 41
 Питома опір речовини 106
 Плавлення 40, 44, 55
 Повне відбивання 164
 Ползунов Іван 60
 Потужність струму 121
 Правило лівої руки 141
 — правої руки 137
 — співвідношення 134
 Провідники і непровідники (ізолятори, діелектрики) електрики 74
 Протон 71
 Резерфорд Ернест 79
 Резистор 89, 99, 112
 Реостат 112
 Робота 16, 60, 61
 Робота струму 121
 Світло 149
 Сила Ампера 141
 Сила струму 94
 Силкові лінії (лінії індукції) магнітного поля 134
 Сублімація 47
 Температура 4, 6, 31
 — кішіни 48, 51, 56
 — плавлення 40, 41, 58
 Температурна шкала Цельсія 7
 Теплова машина 61
 Теплове випромінювання 21, 22
 Тепловий баланс 31, 44, 52
 Тепловий рух 13
 Теплоємність тіла 24, 29
 Теплообмін 17, 22, 54
 Теплопередача 17
 Теплопровідність 19, 22
 Теплота згоряння палива 36
 Термометр 6, 29, 34
 Томсон Вільям (лорд Кельвін) 13, 39, 61
 Турбіна газова 64
 — парова 63
 Уатт Джеймс 60
 Формула лінзи 169
 Шкала поділки шкали приладу 97, 102
 Ядро атома, ядерна модель атома 79
 Якобі Борис 143

Розділ 1

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

§ 1. Тепловий стан тіл і температура	3
§ 2. Вимірювання температури	5
§ 3. Залежність лінійних розмірів та об'єму тіл від температури	8
§ 4. Тепловий рух атомів і молекул. Внутрішня енергія тіла	13
§ 5. Два способи зміни внутрішньої енергії тіл: виконання роботи і теплообмін	15
§ 6. Види теплообміну.	19
§ 7. Кількість теплоти.	23
§ 8. Питома теплоємність речовини	26
<i>Лабораторна робота № 1</i>	29
§ 9. Тепловий баланс. Приклади розв'язування задач	31
<i>Лабораторна робота № 2</i>	34
§ 10. Теплота згоряння палива.	36
§ 11. Закон збереження енергії у механічних і теплових процесах	38
§ 12. Плавлення і кристалізація речовини	40
§ 13. Приклади розв'язування задач з урахуванням процесів плавлення і кристалізації тіл	44
§ 14. Випаровування і конденсація	47
§ 15. Кипіння	50
§ 16. Приклади розв'язування задач з урахуванням процесів випаровування і конденсації	52
§ 17. Пояснення зміни агрегатних станів речовини на основі атомно-молекулярного вчення	54
§ 18. Перетворення теплової енергії в механічну. Принцип дії теплової машини	59
§ 19. Парова і газова турбіни	62
§ 20. Двигун внутрішнього згоряння.	64

Розділ 2

ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА

§ 21. Світ електрики (замість вступу)	68
§ 22. Електризація тіл. Два роди зарядів	69
§ 23. Взаємодія заряджених тіл. Провідники і непровідники електрики	72
§ 24. Електричне поле. Закон Кулона	75
§ 25. Дискретність електричного заряду. Електрон	77
§ 26. Будова атомів	78
§ 27. Заряджання тіл і будова атомів.	81
§ 28. Що таке електричний струм?	84
§ 29. Джерела електричного струму	87
§ 30. Електричне коло.	89
§ 31. Дії електричного струму	90
§ 32. Природа електричного струму. Напрямок струму	92

§ 33. Сила струму та її вимірювання	94
Лабораторна робота № 3	100
§ 34. Електрична напруга та її вимірювання	100
Лабораторна робота № 4	103
§ 35. Електричний опір. Залежність опору провідників від їх геометричних розмірів та речовини. Питомий опір	104
§ 36. Закон Ома для однорідної ділянки кола	107
Лабораторна робота № 5	111
§ 37. Реостати.	111
Лабораторна робота № 6	113
§ 38. Послідовне з'єднання провідників	114
§ 39. Паралельне з'єднання провідників	116
§ 40. Робота і потужність електричного струму.	121
Лабораторна робота № 7	124
§ 41. Кількість теплоти, що виділяється у провіднику зі струмом.	125
§ 42. Застосування теплової дії струму на практиці	127
Лабораторна робота № 8	130

Розділ 3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

§ 43. Магнітне поле струму	133
Лабораторна робота № 9	135
§ 44. Електромагнітні явища та їх застосування	136
§ 45. Постійні магніти. Магнітне поле Землі.	139
§ 46. Дія магнітного поля на провідник зі струмом	141
§ 47. Електровимірювальні прилади	143
§ 48. Електродвигун постійного струму	146
Лабораторна робота № 10.	147

Розділ 4

СВІТЛОВІ ЯВИЩА

§ 49. Що таке світло	149
§ 50. Поширення світла	151
§ 51. Чому в сонячний день уранці та ввечері прохолодно, а вдень тепло.	153
§ 52. Відбивання світла. Закони відбивання	156
§ 53. Плоскі, увігнуті й опуклі дзеркала та їх застосування	158
§ 54. Заломлення світла	162
Лабораторна робота № 11.	165
§ 55. Лінзи. Зображення, які дають лінзи	167
Лабораторна робота № 12.	171
§ 56. Око і зір.	172
§ 57. Фотографія і фотоапарат.	175
§ 58. Лупа	181
§ 59. Мікроскоп.	182
§ 60. Телескопи	183
ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ.	187
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.	189

**Коршак Євген Васильович,
Ляшенко Олександр Іванович,
Савченко Віталій Федорович**

ФІЗИКА

8 клас

2-ге видання, перероблене та доповнене

**Підручник для загальноосвітніх
навчальних закладів**

Розробка серії В. Т. Бусела

Відповідальна за випуск С. П. Круть

Редактор і коректор Л. П. Тютюнник

Художній редактор та художник обкладинки Є. Ф. Сепдовик

Художник О. В. Яценко

Фотографії лабораторних робіт В. Т. Бусела

Комп'ютерна верстка Ю. О. Маненка

Координатори поліграфічного виконання В. Д. Ковальчук, О. В. Паламарчук

Підп. до друку 18.09.2003. Формат 70-84/16.

Гарнітура Тип Тайме. Папір офсетний. Друк офсетний.

Ум. друк. арк. 13,08. Ум. фарбоподб. 53,41. Обл.-вид. арк. 19,18.

Зам 3 661.

Видавничо-торгова фірма «Перун», 08200, Ірпінь, вул. Т. Шевченка, 4-а.

Свідчення про реєстрацію № 13710594 від 30.06.95.

Тел./факс (04497) 54-697, м. Ірпінь.

Віддруковано у ВАТ «Поліграфкнига».

03057, Київ-57, вул. Довженка, 3.

