ВИДАВНИЦТВО
РАНОК

Інтернет-
підтримка

ФІЗИКА

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

8

КЛАС

ІНСТРУКЦІЯ З БЕЗПЕКИ ДЛЯ УЧНІВ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЗАНЯТЬ У КАБІНЕТІ ФІЗИКИ

1 Загальні положення

1.1. У кабінеті фізики слід суворо дотримуватися правил безпеки та правил внутрішнього розпорядку навчального закладу, установлених норм і режимів праці та відпочинку.

1.2. У кабінеті фізики можна перебувати тільки у присутності вчителя або лаборанта.

1.3. Про кожний нещасний випадок, що трапився під час навчального процесу, слід негайно повідомити вчителя.

1.4. Про вихід із ладу або несправність обладнання слід негайно повідомити вчителя.

2 Вимоги безпеки в екстремальних ситуаціях

2.1. У разі травмування, нездужання тощо слід негайно повідомити про це вчителя.

2.2. У разі виникнення загоряння, пожежі тощо слід негайно повідомити про це вчителя.

2.3. У випадку евакуації чітко виконуйте розпорядження вчителя.

3 Вимоги безпеки перед початком експериментальної роботи

3.1. Чітко з'ясуйте порядок і правила безпечного виконання роботи.

3.2. Звільніть робоче місце від усіх не потрібних для роботи предметів і матеріалів.

3.3. Перевірте наявність і надійність з'єднувальних проводів, приладів та інших предметів, необхідних для виконання завдань.

3.4. Починайте виконувати роботу тільки з дозволу вчителя.

3.5. Виконуйте тільки ті завдання, які передбачені в роботі або доручені вчителем.

4 Вимоги безпеки під час експериментальної роботи

4.1. Працюйте лише на своєму робочому місці.

4.2. Будьте уважні й дисципліновані, точно виконуйте вказівки вчителя.

4.3. Розміщуйте прилади, матеріали, обладнання на своєму робочому місці так, щоб запобігти їх падінню або перекиданню.

4.4. Під час проведення дослідів не допускайте граничних навантажень вимірювальних приладів.

4.5. Стежте за справністю всіх кріплень у приладах і пристроях. Не торкайтесь обертових частин машин і не нахиляйтеся над ними.

4.6. Для складання експериментальних установок користуйтеся провідниками з клемами й запобіжними чохлами з міцною ізоляцією та без видимих пошкоджень.

4.7. Без дозволу вчителя не вмикайте електричне обладнання; самостійно не усувайте несправності електромережі й електрообладнання.

4.8. Складаючи електричне коло, уникайте перетину провідників; заборонено користуватися провідниками з пошкодженою ізоляцією та вимикачами відкритого типу.

4.9. Джерело струму вмикайте в електричне коло в останню чергу. Складене коло вмикайте тільки після перевірки і з дозволу вчителя. Наявність напруги в колі можна перевіряти тільки спеціальними приладами або індикаторами напруги.

4.10. Не торкайтесь елементів кола, що не мають ізоляції й перебувають під напругою. Не виконуйте з'єднання в колах і не замінюйте запобіжники до вимикання джерела електроживлення.

4.11. Користуйтесь інструментами із заізольованими ручками.

4.12. Не залишайте робоче місце без дозволу вчителя.

4.13. Виявивши несправність в електричному обладнанні, яке перебуває під напругою, негайно повідомте про це вчителя.

4.14. Для приєднання споживачів до мережі користуйтеся штепсельними з'єднаннями.

5 Вимоги безпеки після закінчення роботи

5.1. Після закінчення роботи обов'язково приберіть робоче місце. Прибирання виконуйте тільки з дозволу вчителя.

5.2. Електричне коло розбирайте тільки після вимкнення джерела електроживлення.

ФІЗИКА

8 КЛАС

Підручник для 8 класу
закладів загальної середньої освіти

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

2-ге видання, перероблене

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України

Харків
Видавництво «Ранок»
2021

УДК 37.016:53(075.3)
Ф50

Авторський колектив:
Віктор Бар'яхтар, Станіслав Довгий, Фаїна Божинова, Олена Кірюхіна

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України
від 22.02.2021 № 243)

**Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено**

Автори й видавництво висловлюють щиру подяку:
М. М. Кірюхіну, президенту Спілки наукових і інженерних об'єднань України, кандидату фізико-математичних наук;
І. Ю. Ненашеву, учителю-методисту, заслуженому вчителю України;
І. В. Хован, учителю фізики, кандидату педагогічних наук,
за слушні зауваження й конструктивні поради;
І. С. Чернецькому, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук,
за допомогу у створенні відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

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

Ілюстрації *Володимира Хорошенка, Володимира Зюзюкіна*

Фізика : підруч. для 8 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.] ; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. — 2-ге вид., перероб. — Харків : Вид-во «Ранок», 2021. — 240 с. : іл., фот.
Ф50

ISBN 978-617-09-6973-6

УДК 37.016:53(075.3)

Інтернет-підтримка

© Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я., Довгий С. О., Кірюхіна О. О., 2016
© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О., перероблення, 2021
© Хорошенко В. Д., Зюзюкін В. В., ілюстрації, 2016
© Хлистун В. В., фотографії, 2016
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2021

ISBN 978-617-09-6973-6

Дорогі друзі!

Цього навчального року ви продовжите свою подорож світом фізики. Як і раніше, ви будете спостерігати явища природи, проводити справжні наукові експерименти й на кожному уроці робити власні маленькі відкриття.

Жодна справжня подорож не буває легкою, але ж скільки нового ви дізнаєтеся про світ навколо! А підручник, який ви тримаєте в руках, стане для вас надійним помічником.

Будьте уважними й наполегливими, вивчаючи зміст кожного параграфа, і тоді ви зможете зрозуміти суть викладеного матеріалу та застосувати здобуті знання в повсякденному житті.

Зверніть увагу на те, що параграфи завершуються рубриками: *«Підбиваємо підсумки»*, *«Контрольні запитання»*, *«Вправа»*. Для чого вони потрібні і як з ними краще працювати?

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

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

Рубрика *«Вправа»* зробить вашу подорож у дивовижний світ фізики ще цікавішою, адже ви зможете застосувати отримані знання на практиці. Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які слід виявити кмітливість і наполегливість. Номер кожного завдання має свій колір (у порядку підвищення складності: синій, зелений, оранжевий, червоний, фіолетовий).

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

Довідкові дані, необхідні для виконання завдань, ви знайдете в *Додатку* наприкінці підручника.

Зверніть увагу на те, що в підручнику є матеріал, обмежений позначками * і ↩, — він призначений для тих, хто прагне знати більше.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання* та *лабораторні роботи*. Обов'язково виконуйте їх — і ви будете краще розуміти фізику. Радимо опрацьовувати *завдання «із зірочкою»*, завдяки яким ви навчитеся подавати результати експериментів так, як це роблять справжні вчені. Впоратися із цими завданнями вам допоможе матеріал, поданий наприкінці *Додатка*.

Матеріали, запропоновані наприкінці кожного розділу в рубриках *«Підбиваємо підсумки розділу»*, *«Завдання для самоперевірки»*, а також матеріали *«До практикумів із розв'язування задач»* наприкінці підручника допоможуть систематизувати отримані знання, будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Після кожного розділу підручника подано *теми навчальних проєктів, рефератів і повідомлень, експериментальних досліджень*. Зазначимо, що ці теми є орієнтовними. Тож якщо ви не хочете зупинятися на досягнутому, то можете запропонувати власні теми, а потім якісно їх опрацювати.

В *інтернет-підтримці* підручника ви знайдете відеоролики, що показують у дії певний фізичний дослід або процес; інформацію, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою. Працюючи над навчальними проєктами, радимо уважно ознайомитися з деякими порадами щодо їх створення і презентації, поданими в матеріалі «*Етапи роботи над навчальним проєктом*».

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

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

Підбиваємо підсумки

Завдання на повторення

Контрольні запитання

Експериментальне завдання

Вправа

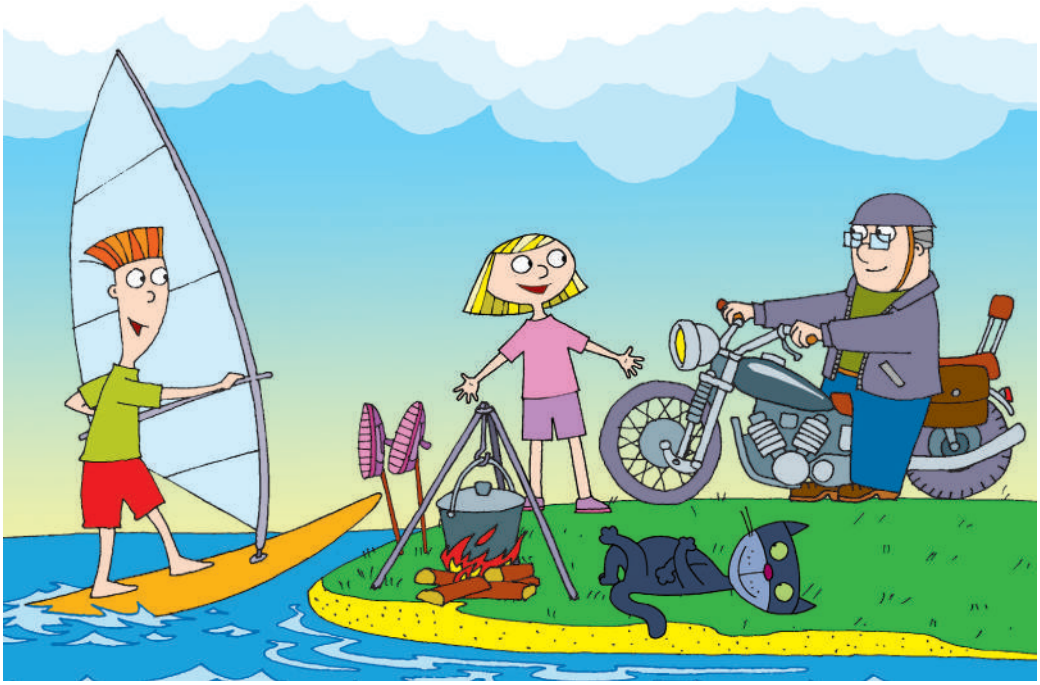
Інтернет-підтримка

Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!

РОЗДІЛ I

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

- Ви багато разів спостерігали дію вітру, а тепер зможете пояснити, чому виникає вітер
- Ви неодноразово кип'ятили воду і знаєте температуру кипіння води, а тепер дізнаєтесь, як змусити воду закипіти за кімнатної температури
- Ви завжди надягаєте взимку теплі речі, а тепер з'ясуєте, чи завжди їх надягають, щоб захиститися від холоду
- Ви чули про існування наноматеріалів, а тепер дізнаєтеся про їхні властивості та перспективи застосування
- Ви знаєте, що більшість автомобілів має двигун внутрішнього згоряння, а тепер зможете пояснити, як цей двигун працює і як збільшити його ККД



ЧАСТИНА 1. ТЕМПЕРАТУРА. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

§ 1. ТЕПЛОВИЙ СТАН ТІЛ. ТЕМПЕРАТУРА ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

Для всіх змалку є звичними слова: гаряче, тепле, холодне. «Обережно, чашка гаряча, обпечешся», — застерігали нас дорослі. Ми не розуміли, що означає «гаряча», торкалися чашки — і обпікалися. «Сніг холодний, не знімай рукавичок, пальчики змерзнуть», — умовляла бабуся. Нам дуже хотілося дізнатись, а як це — «холодний», ми знімали рукавички й невдовзі розуміли значення цього слова. «Доведеться побути в ліжку. Температура висока», — наполягав лікар... А що ж таке температура з погляду фізики?

1 Знайомимося з поняттям «температура»

Початкових уявлень про температуру людина набула за допомогою дотику. Характеризуючи, наприклад, тепловий стан дуже холодного тіла, можна сказати про нього «крижане», тобто порівняти свої відчуття від дотику до цього тіла з відчуттями, що виникають унаслідок дотику до криги.

З'ясовуючи, *наскільки нагріті* ті чи інші тіла, ми порівнюємо їхні температури. Коли говорять: «Сьогодні надворі тепліше, ніж учора», — це означає, що температура повітря на вулиці сьогодні вища, ніж учора; фраза «Сніг на дотик холодний» означає, що температура снігу нижча від температури руки. Таким чином, на інтуїтивному рівні ми визначаємо

а

б

Рис. 1.1. Досліди на підтвердження суб'єктивності наших відчуттів: *а* — гладенький папір здається холоднішим, ніж шорсткий килимок; *б* — якщо занурити ліву руку в теплу воду, праву — в холодну, а через деякий час обидві руки помістити в посудину з водою кімнатної температури, то виникне дивне відчуття: ту саму воду ліва рука сприйме як холодну, а права — як теплу

температуру тіла як фізичну величину, що характеризує ступінь нагрітості тіла.

Однак, визначаючи ступінь нагрітості тіл на дотик, можна дати лише приблизну оцінку їхньої температури. Крім того, не завжди можна торкнутися тіла й оцінити, наскільки воно гаряче або холодне. Більш того, відчуття можуть нас обманювати. Справді, за тієї самої кімнатної температури металеві предмети здаються холоднішими, ніж дерев'яні або пластмасові, а шорсткі — теплішими, ніж гладенькі (рис. 1.1, *а*). І навіть одне тіло в той самий момент може мати на дотик різний ступінь нагрітості (рис. 1.1, *б*).

2 Вводимо поняття теплової рівноваги

Досліди показують: коли більш нагріте тіло контактує з менш нагрітим, то більш нагріте тіло завжди охолоджується, а менш нагріте — нагрівається. До того ж можуть змінюватися й інші властивості тіл: вони стають більшими або меншими за розмірами, можуть перейти в інший агрегатний стан, почати краще чи гірше проводити електричний струм, можуть почати випромінювати світло іншого кольору та ін. Натомість *однаково нагріті тіла, контактуючи одне з одним, не змінюють своїх властивостей*, і тоді кажуть, що *ці тіла перебувають* **у стані теплової рівноваги** (рис. 1.2).

Температура — це фізична величина, яка характеризує стан теплової рівноваги системи тіл.

3 Дізнаємося про фізичний зміст температури

Температура тіла тісно пов'язана зі швидкістю хаотичного руху частинок речовини, з яких складається тіло (атомів, молекул, йонів). Цей рух так і називають — *тепловий*.

Частинки речовини завжди рухаються, отже, завжди *мають кінетичну енергію*. Чим швидше рухаються частинки, тим вища температура тіла.

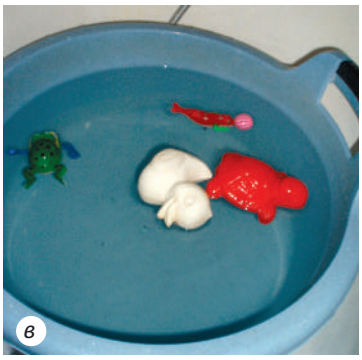


Рис. 1.2. Однаково гарячі або однаково холодні тіла перебувають у стані теплової рівноваги: *а* — книжки перебувають у стані теплової рівноваги зі столом; *б* — дрова перебувають у стані теплової рівноваги з повітрям; *в* — іграшки перебувають у стані теплової рівноваги з водою

Швидкість руху окремих частинок (а отже, їхня кінетична енергія) безперервно змінюється. Проте в стані теплової рівноваги в усіх тілах системи середня кінетична енергія частинок (тобто кінетична енергія, що припадає в середньому на одну частинку) є однаковою. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії можна дати таке означення температури:

Температура — міра середньої кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини, із яких складається тіло.

Отже, є об'єктивний чинник для визначення температури тіла — це середня кінетична енергія його частинок. Цей чинник не залежить від наших відчуттів, проте він аж ніяк не допоможе виміряти температуру.

Як ви вважаєте, чому неможливо безпосередньо виміряти середню кінетичну енергію руху частинок, з яких складається тіло?

4 Вимірюємо температуру

Прилади для вимірювання температури називають **термометрами**.

Дія термометрів заснована на тому, що зі зміною температури тіла змінюються певні властивості цього тіла (рис. 1.3).

Розглянемо, наприклад, *рідинний термометр*, дія якого ґрунтується на розширенні рідини під час нагрівання (докладніше про це ви дізнаєтесь із § 2). Найпростіший рідинний термометр складається з резервуара, наповненого рідиною (зазвичай спиртом), довгої тонкої трубки, у яку виступає стовпчик цієї рідини, і шкали (рис. 1.4). Об'єм рідини є мірою температури: чим вища температура тіла, тим більшим є об'єм рідини й тим вищий стовпчик рідини в термометрі.

Щоб за довжиною стовпчика рідини можна було визначати температуру, слід нанести шкалу, насамперед позначивши на ній так звані *реперні точки*, тобто точки, на яких ґрунтується температурна шкала. Вони мають бути пов'язані з якимись фізичними процесами, які відбуваються за незмінної температури та які легко відтворити. Так, для побудови

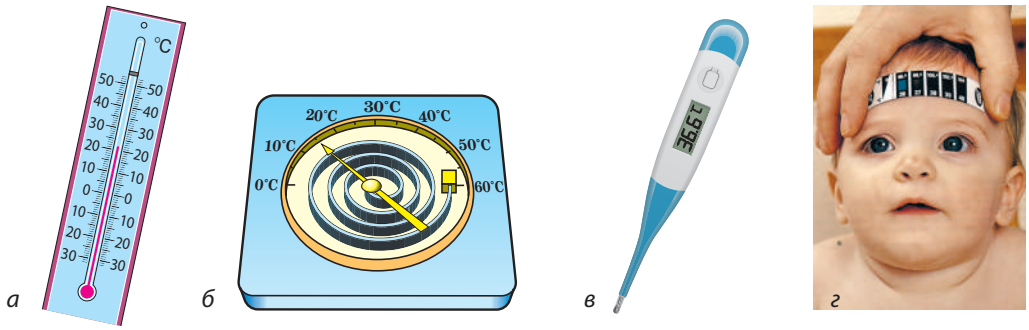


Рис. 1.3. Різні види термометрів: *а — рідинний* (мірою температури є довжина стовпчика рідини); *б — металевий* (біметалева пластинка, яка з'єднана зі стрілкою термометра, вигинається в результаті нагрівання); *в — побутовий електронний термометр* (зі зміною температури змінюються покази на цифровому табло); *г — рідинно-кристалічний* (унаслідок зміни температури змінюються колір відповідної ділянки термометра)

найбільш використовуваної *шкали Цельсія* за реперні точки беруть:

0 °С — *температуру танення чистого льоду за нормального атмосферного тиску.* Для цього резервуар майбутнього термометра опускають у лід, що тане, і, дочекавшись, коли стовпчик рідини припинить рух, навпроти поверхні рідини в стовпчику ставлять позначку 0 °С (рис. 1.5, *а*);

100 °С — *температуру кипіння води за нормального атмосферного тиску.* Резервуар майбутнього термометра занурюють у киплячу воду і положення стовпчика рідини позначають як 100 °С (рис. 1.5, *б*).

Поділивши відстань між позначками 0 і 100 °С на сто рівних частин, отримаємо термометр, який проградуйовано за шкалою Цельсія, та одиницю температури за цією шкалою — **градус Цельсія** (°С).

1 °С *дорівнює одній сотій частині зміни температури води під час її нагрівання від температури плавлення до температури кипіння за нормального атмосферного тиску.*

Температуру, виміряну за шкалою Цельсія, позначають символом t:

$$[t] = 1\ ^\circ\text{C}.^*$$

У СІ за основну одиницю температури взято **кельвін (К).** Температура, виміряна за шкалою Цельсія (t), пов'язана з температурою, виміряною за шкалою Кельвіна (T), співвідношенням:

$$t = T - 273.$$

Зверніть увагу: *термометр показує власну температуру*, отже, вимірюючи температуру будь-якого тіла, слід дочекатися стану теплової рівноваги між тілом і термометром.

Чому для вимірювання температури лікарі радять тримати термометр кілька хвилин?

Підбиваємо підсумки

Якщо в будь-який спосіб створити контакт між тілами, через деякий час їхні властивості припинять змінюватися. Тоді

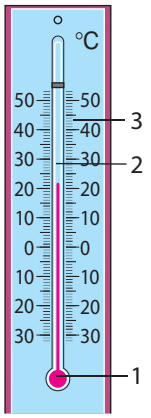


Рис. 1.4. Будова рідинного термометра: 1 — резервуар із рідиною; 2 — трубка; 3 — шкала

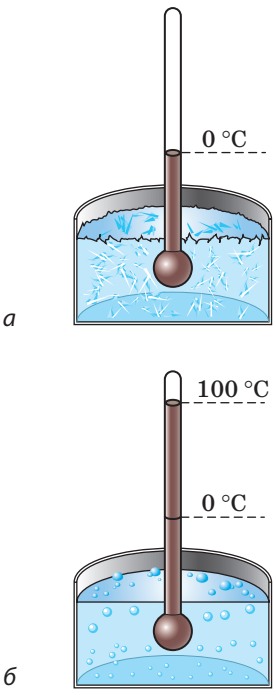


Рис. 1.5. Побудова температурної шкали Цельсія: *а* — температурі танення льоду приписують значення 0 °С; *б* — температурі кипіння води приписують значення 100 °С

* Під час перевірки одиниць у ході розв'язування задач цифру 1 зазвичай опускають.

говорять, що тіла перебувають у стані теплової рівноваги. Фізичну величину, яка характеризує стан теплової рівноваги, називають температурою. Температура — це міра середньої кінетичної енергії руху частинок речовини, із яких складається тіло. Прилади для вимірювання температури називають термометрами. Дія термометрів ґрунтується на тому, що зі зміною температури змінюються певні властивості тіл.

Контрольні запитання

1. Чому не завжди можна оцінити температуру тіла на дотик? **2.** У чому полягає стан теплової рівноваги? **3.** Наведіть два означення температури. **4.** Чому хаотичний рух частинок речовини називають тепловим рухом? **5.** Наведіть приклади різних термометрів. **6.** Опишіть принцип дії рідинного термометра. **7.** Назвіть реперні точки шкали Цельсія.

Вправа № 1

1. Наведіть приклади тіл, що перебувають у стані теплової рівноваги. Обґрунтуйте свою відповідь.

2. Згадайте будову й принцип дії рідинного термометра та поясніть, що більше розширюється під час нагрівання — скло чи рідина.

3. Чому розміри термометра мають бути невеликими порівняно з розмірами тіла, температуру якого вимірюють?

4. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про історію створення термометрів і різних температурних шкал (Фаренгейта, Реомюра тощо). Підготуйте коротке повідомлення.

5. Визначте ціну поділки та покази термометрів на рис. 1.3, *а*, *б*.

Експериментальне завдання

Проведіть дослід із теплою та холодною водою, описаний у пункті 1 § 1. Опишіть послідовність своїх дій, зробіть висновок.

Фізика і техніка в Україні

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Вєркіна НАН України (Харків) був заснований у 1960 р. для вивчення фізичних явищ за низьких температур. Ці дослідження були важливими для освоєння космічного простору.

Завдання, поставлені перед науковцями, передбачали дослідження теплових властивостей газів, рідин і твердих тіл в умовах космосу. Досвіду таких досліджень у світі не було, тому довелося починати з методів вимірювання температури, теплопровідності, вивчення особливостей конвекції та випромінювання. В усіх напрямах співробітники інституту досягли видатних наукових результатів. Про це свідчать і численні наукові премії, в тому числі міжнародні.

У 1991 р. інституту присвоєно ім'я його засновника та першого директора — академіка *Бориса Ієремійовича Вєркіна* (1919–1990).

§ 2. ЗАЛЕЖНІСТЬ РОЗМІРІВ ФІЗИЧНИХ ТІЛ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Якщо ви досить спостережливі, то, можливо, звертали увагу ось на що. Влітку електричні дроти провисають набагато сильніше, ніж узимку, тобто влітку вони виявляються довшими. Якщо набрати повну пляшку холодної води та поставити її відкритою в тепле місце, то згодом частина води з пляшки виллється. Повітряна кулька, винесена з кімнати на мороз, зменшується в об'ємі. Спробуємо розібратися, чому так.

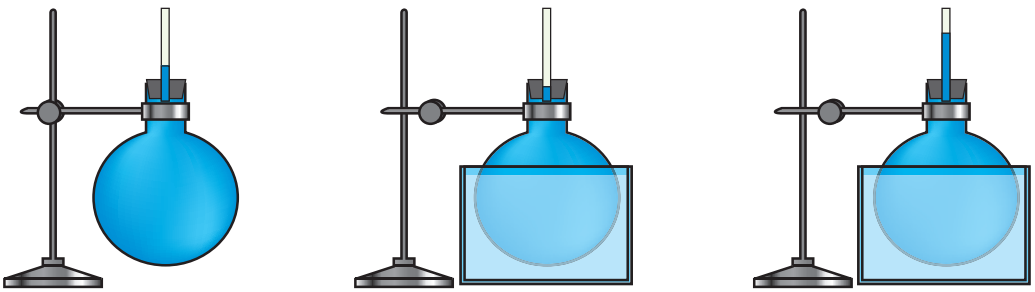
1 Переконуємося в тепловому розширенні твердих тіл, рідин і газів

Нескладні досліди й численні спостереження переконують у тому, що, *як правило, тверді тіла, рідини й гази під час нагрівання розширюються, а під час охолодження — стискуються.*

Теплове розширення газів можна спостерігати за допомогою колби, заповненої повітрям. Шийку колби щільно закоркуємо, а в корок уставимо скляну трубку. Занурімо скляну трубку в посудину з водою. Тепер досить узятися за колбу рукою і в такий спосіб нагріти її. У результаті повітря в колбі розшириться та виходитиме у вигляді бульбашок із трубки під водою (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Нагріваючись, повітря в колбі розширюється, і деяка його частина виходить із колби — біля отвору трубки утворюються бульбашки повітря

Для спостереження *теплового розширення рідин* наповнимо колбу підфарбованою водою та закоркуємо так, щоб частина рідини потрапила у скляну трубку, розміщену в корку (рис. 2.2, *а*). Зафіксуємо, на якому рівні розташована рідина в трубці, й опустимо колбу в посудину з гарячою



а *б* *в*

Рис. 2.2. Дослід, який демонструє, що під час нагрівання рідина розширюється. Закорковану колбу з рідиною в трубці (*а*) помістили в посудину з гарячою водою. Рівень рідини в трубці спочатку трохи знизився (*б*), а через деякий час — значно підвищився (*в*)

водою. Спочатку рівень води в трубці трохи знизиться (рис. 2.2, *б*), і це пояснюється тим, що спочатку нагрівається й розширюється колба, а вже потім, нагріваючись, розширюється вода. Через деякий час переконаємося, що в міру нагрівання колби та води в ній рівень рідини в трубці помітно підвищується (рис. 2.2, *в*). Отже, рідини, як і гази, під час нагрівання розширюються.

? Поясніть принципи роботи рідинного термометра.

Теплове розширення твердих тіл можна продемонструвати за допомогою пристрою, який винайшов нідерландський фізик *Вільгельм Якоб Ґравезанд* (1688–1742). Пристрій являє собою мідну кульку, яка легко проходить крізь пригнане до неї кільце. Нагріємо кульку в полум'ї спиртівки — нагріта кулька крізь кільце не проходитиме (рис. 2.3, *а*). Після охолодження кулька знову легко пройде крізь кільце (рис. 2.3, *б*).

? На вашу думку, чи пройде кулька крізь кільце, якщо нагріти не кульку, а кільце?

2 З'ясовуємо причину теплового розширення

У чому ж причина збільшення об'єму тіл під час нагрівання, адже кількість частинок речовини (молекул, атомів, йонів) у тілі зі збільшенням температури не змінюється?

Теплове розширення тіл пояснюється так. Зі збільшенням температури збільшується кінетична енергія частинок речовини, з яких складається тіло. Середня відстань між частинками також збільшується, і, відповідно, збільшується об'єм тіла. І навпаки, зі зниженням температури тіла кінетична енергія частинок зменшується, проміжки між частинками зменшуються теж і, відповідно, зменшується об'єм тіла.

3 Характеризуємо теплове розширення тіл

Зрозуміло, що не всі тіла під час нагрівання на ту саму температуру розширюються однаково. Дослідним шляхом з'ясовано, що *тверді тіла та рідини розширюються набагато менше, ніж гази*.

Теплове розширення тіла залежить від речовини, з якої складається тіло. Візьмемо алюмінієву трубку за кімнатної температури та вимірюємо її довжину. Потім нагріємо трубку, пропускаючи крізь неї гарячу

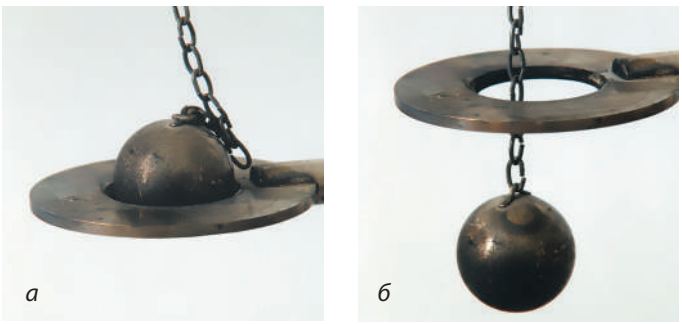


Рис. 2.3. Пристрій Ґравезанда, за допомогою якого ілюструють теплове розширення твердих тіл:
а — у нагрітому стані кулька не проходить крізь кільце;
б — після охолодження кулька крізь кільце проходить

воду. Через деякий час переконаємося, що довжина трубки трохи збільшилась. Замінивши алюмінієву трубку на скляну тієї самої довжини, побачимо, що за умови однакового збільшення температури скляна трубка видовжується набагато менше, ніж алюмінієва.

Слід зазначити, що *існують речовини, об'єм яких на певному інтервалі температур під час нагрівання зменшується, а під час охолодження — збільшується*. До таких речовин належать вода, чавун і деякі інші. Вода, наприклад, під час охолодження до 4 °С (точніше, до 3,98 °С) стискується, як і більшість речовин. Однак починаючи з температури 4 °С і до замерзання (0 °С) вода розширюється. Саме завдяки цій властивості річки, моря й океани не промерзають до дна навіть у сильні морози. Адже саме за температури 4 °С вода має найбільшу густину і тому опускається на дно водойми. За температури ж 0 °С густина води є меншою, тому така вода залишається на поверхні й замерзає — перетворюється на лід (рис. 2.4). Оскільки густина льоду менша від густини води, лід розташовується на поверхні води та надійно захищає водойму від глибокого промерзання. Зазначені властивості води мають неабияке значення для життя різноманітних водоростей, риб та інших істот у водоймах.

Поміркуйте, який вигляд мали б водойми, якби вода, як і більшість речовин, під час охолодження завжди зменшувалася б в об'ємі, а густина льоду була би більшою за густину води.

4 Знайомимося з тепловим розширенням у природі й техніці

Здатність тіл змінювати свої розміри під час змінення температури відіграє дуже важливу роль у природі. Про особливості теплового розширення води ви вже дізналися. Розглянемо інші приклади.

Поверхня Землі прогрівається нерівномірно. У результаті повітря поблизу її поверхні прогрівається і розширюється теж нерівномірно — утворюються вітри, які, в свою чергу, впливають на зміну погоди і клімат. Нерівномірне прогрівання води в морях і океанах — одна з причин виникнення течій, які теж суттєво впливають на клімат. Різкі коливання температури в гірських районах викликають нерівномірні розширення та стискання гірських порід — виникають тріщини, що спричиняють руйнування гір, а отже, зміну рельєфу.

Явище теплового розширення широко використовується в техніці та побуті. Так, для автоматичного вимикання та вмикання електричних пристроїв використовують біметалеві

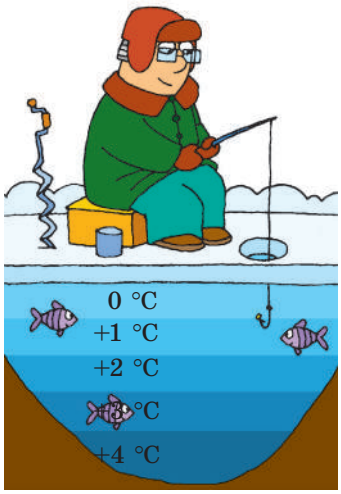


Рис. 2.4. Розподіл температур у глибокій водоймі взимку. Найвища температура води — на дні водойми, найнижча (0 °С) — безпосередньо під шаром льоду

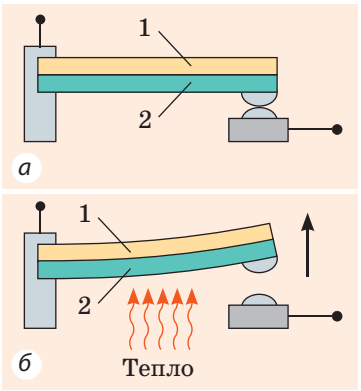


Рис. 2.5. Для автоматичного вимкнення електронагрівальних пристроїв (наприклад, чайника) використовують біметалеві пластинки (*а*). У разі збільшення температури металева смуга 2 розширюється більше, ніж смуга 1, виготовлена з іншого металу, тому пластинка вигинається і розмикає електричне коло (*б*)

Рис. 2.6. Щоб міст не вигинався під час спеки й не руйнувався в мороз, його виготовляють з окремих секцій, з'єднаних спеціальними зчленуваннями (ряди зубців змикаються під час спеки й розходяться під час морозів)

пластинки. Дія таких пластинок заснована на тому, що різні метали по-різному розширюються під час нагрівання (рис. 2.5). Теплове розширення повітря допомагає рівномірно прогріти квартиру, остудити продукти в холодильнику, провітрити помешкання (чому і як це відбувається, ви дізнаєтесь із § 6).

Теплове розширення слід обов'язково брати до уваги під час будівництва мостів (рис. 2.6) і ліній електропередачі, прокладання труб опалення, укладання залізничних рейок, виготовлення залізобетонних конструкцій і в багатьох інших випадках.

Підбиваємо підсумки

Зазвичай тверді тіла, рідини й гази під час нагрівання розширюються, а під час охолодження стискуються. Тверді тіла та рідини розширюються набагато менше, ніж гази. Зміна розмірів тіла внаслідок зміни температури залежить від речовини, з якої складається це тіло.

Причина теплового розширення полягає в тому, що зі збільшенням температури збільшується швидкість руху частинок речовини (атомів, молекул, йонів) і в результаті збільшується середня відстань між частинками.

Явище теплового розширення враховують і широко використовують у техніці й побуті. Воно відіграє дуже важливу роль у природі.

Контрольні запитання

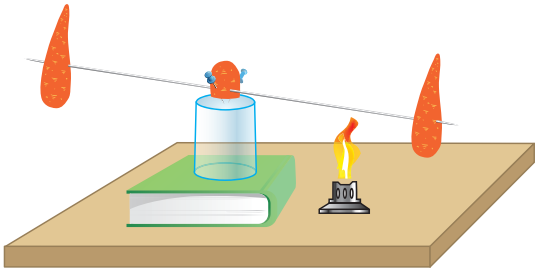
1. Наведіть приклади на підтвердження того, що тверді тіла, рідини й гази розширюються під час нагрівання. **2.** Опишіть досліди, які демонструють теплове розширення газів, рідин, твердих тіл. **3.** У чому причина збільшення об'єму тіл під час нагрівання? **4.** Від чого (крім температури) залежить зміна розмірів тіл під час їх нагрівання або охолодження? **5.** Які особливості теплового розширення води? **6.** Наведіть приклади застосування теплового розширення в техніці, побуті.

Вправа № 2

1. Виберіть *усі* правильні закінчення речення.
Коли тіло охолоджується, то зменшується...
а) швидкість руху його частинок
б) відстань між його частинками
в) кількість частинок тіла
г) розміри частинок тіла
2. Як зміниться об'єм повітряної кульки, якщо її перенести з холодного приміщення в тепле? Поясніть свою відповідь.
3. Згадайте дослід із мідною кулькою, яка в результаті нагрівання застрягає в кільці (див. рис. 2.3). Як змінюються внаслідок нагрівання об'єм, маса, густина кульки; середня швидкість руху частинок кульки?
4. Уявіть, що термометр для вимірювання температури на вулиці замість спирту заповнили водою. Чому такий термометр буде незручним?
5. Чому на точних вимірювальних приладах зазначають температуру?
6. Якщо в холодну скляну банку налити окріп (або навпаки — налити холодну воду в гарячу банку), банка може тріснути. Поясніть це з точки зору теплового розширення тіл.
7. Металева кулька падає на підлогу з деякої висоти. Які перетворення механічної енергії відбуваються під час падіння кульки? Куди «зникає» механічна енергія кульки після удару об підлогу?

Експериментальні завдання

1. «*Теплові терези*». Виготовте «терези», які реагують на різницю температур (див. рисунок).



Для цього:
1) пропустіть крізь обрізок морквини сталеву в'язальну спицю;
2) з обох боків спиці застроміть в обрізок морквини дві булавки, а на кожний кінець спиці насадіть невелику морквину так, щоб більша частина морквини була розташована знизу;
3) установіть булавки гострими кінцями на дно склянки і, пересуваючи морквини, зрівноважте «терези».
Розташуйте під одним із плечей «терезів» запалену свічку — через деякий час це плече опуститься; приберіть свічку — плече повернеться до початкового положення. Поясніть спостережуване явище.
2. Як за допомогою дощечки, молотка та двох цвяшків продемонструвати, що розмір монети в результаті нагрівання збільшується? Виконайте відповідний дослід, обов'язково використовуючи пінцет (щипці або пасатижі). Поясніть спостережуване явище.

Відеодослід. Перегляньте відеоролик і поясніть спостережуване явище.

§ 3. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ

У новинах, коли йдеться про космічні дослідження, ви могли чути фразу на зразок: «Супутник увійшов в атмосферу Землі й припинив своє існування». Але ж зрозуміло, що супутник мав величезну механічну енергію — кінетичну, оскільки він рухався, та потенціальну, оскільки був високо над поверхнею Землі. Куди ж зникла колосальна енергія супутника? Фізики пояснюють, що ця енергія передалася частинкам (молекулам, атомам, йонам) повітря та частинкам супутника, тобто перейшла в енергію всередині речовин. Цю енергію називають внутрішньою. Про те, що таке внутрішня енергія, і йтиметься далі.

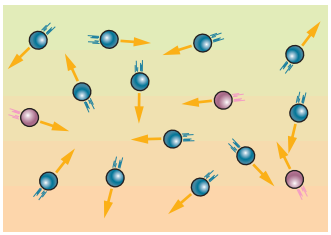


Рис. 3.1. Кожна частинка речовини перебуває в стані безперервного хаотичного руху, завдяки чому має кінетичну енергію

Рис. 3.2. Сумарна кінетична енергія частинок повітря, наприклад, у великій шафі становить близько 0,4 МДж. Цієї енергії достатньо, щоб усіх учнів вашого класу підняти приблизно на 25 м

1 Знайомимося з поняттям внутрішньої енергії

Ми вже звертали увагу на те, що завдяки тепловому руху *кожна частинка речовини завжди має кінетичну енергію* (рис. 3.1).

Зрозуміло, що кінетична енергія окремої частинки незначна, оскільки маса частинки є дуже малою. Водночас кількість частинок в одиниці об'єму речовини величезна, і тому їхня сумарна кінетична енергія є досить великою (рис. 3.2).

Крім кінетичної енергії частинки речовини мають і потенціальну енергію, тому що (згадайте молекулярно-кінетичну теорію) взаємодіють одна з одною — притягуються та відштовхуються.

Суму кінетичних енергій теплового руху частинок, із яких складається тіло, і потенціальних енергій їхньої взаємодії називають **внутрішньою енергією тіла.**

Одиниця внутрішньої енергії в СІ — **джоуль** (Дж).

Згадайте інші фізичні величини, одиницею яких в СІ є джоуль.

2 З'ясовуємо, коли змінюється внутрішня енергія тіла

Мірою середньої кінетичної енергії руху частинок речовини, із яких складається тіло, є температура. Зі зміною температури змінюється сумарна кінетична енергія всіх частинок, а отже, змінюється внутрішня енергія тіла.

Крім того, зі зміною температури тіло розширюється або стискається. При цьому

змінюється відстань між частинками речовини і, як наслідок, змінюється потенціальна енергія їхньої взаємодії. Це теж, у свою чергу, зумовлює зміну внутрішньої енергії тіла.

Отже, *внутрішня енергія тіла змінюється зі зміною його температури: зі збільшенням температури тіла його внутрішня енергія збільшується, а зі зменшенням температури — зменшується.*

Внутрішня енергія змінюється також зі зміною агрегатного стану речовини: під час зміни агрегатного стану речовини змінюється взаємне розташування її частинок, тобто змінюється потенціальна енергія їхньої взаємодії (рис. 3.3). Наприклад, під час плавлення речовини її внутрішня енергія збільшується, а під час кристалізації — зменшується (рис. 3.4). Докладніше про це ви дізнаєтеся наприкінці розділу I «Теплові явища».

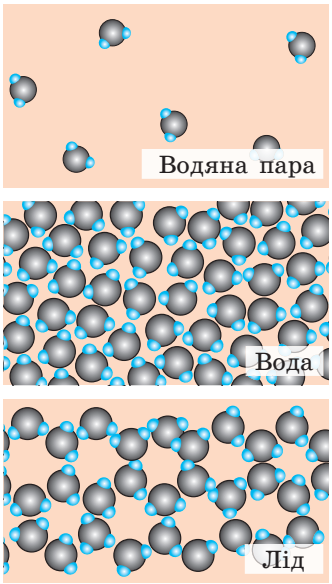


Рис. 3.3. У різних агрегатних станах взаємне розташування молекул речовини є різним, тому відрізняється і потенціальна енергія взаємодії молекул

3 Розрізняємо внутрішню і механічну енергії

Під час вивчення механіки йшлося про те, що суму кінетичної та потенціальної енергій системи тіл називають повною механічною енергією цієї системи. Дехто з вас, можливо, скаже: «То виходить, що внутрішня енергія і механічна енергія — одне й те саме!» Проте це не так.

Дещо схожі за формальними ознаками, ці поняття значно різняться своєю сутністю — їх навіть вивчають у різних розділах фізики. Згодом ви дізнаєтеся про це детальніше, а зараз зазначимо тільки деякі відмінності.

Коли розглядають механічну енергію, то йдеться про одне або декілька тіл. А от коли розглядають внутрішню енергію, то йдеться про рух і взаємодію дуже великої кількості частинок (наприклад, в 1 г води міститься більш ніж 10^{22} молекул!). Зрозуміло, що у випадку із внутрішньою енергією не можна відстежити індивідуальні характеристики кожної частинки, тому фізики використовують тільки *середні характеристики* (про середню кінетичну енергію ви вже знаєте).

Рис. 3.4. За однакової температури внутрішня енергія льоду є меншою від внутрішньої енергії тієї самої маси води

Рис. 3.5. Механічна енергія наплічника, що лежить на підлозі *(а)*, стоїть на стільці *(б)* або рухається разом із хлопчиком *(в)*, є різною, а внутрішня енергія — однаковою

Механічна енергія залежить від руху й розташування фізичного тіла відносно інших тіл або частин тіла відносно одна одної. Натомість внутрішня енергія визначається характером руху та взаємодії тільки частинок тіла. Так, механічна енергія наплічника, що лежить на підлозі, стоїть на стільці або «подорожує» разом із вами шкільним коридором, є різною, а от його внутрішня енергія за незмінної температури буде однаковою (рис. 3.5).

Підбиваємо підсумки

Будь-яке фізичне тіло має внутрішню енергію. Внутрішня енергія тіла — це сума кінетичних енергій усіх частинок, з яких складається тіло, і потенціальних енергій їхньої взаємодії.

Внутрішня енергія тіла змінюється зі зміною його температури та в процесі зміни агрегатного стану речовини, з якої це тіло складається.

Контрольні запитання

1. Чому частинки речовини мають потенціальну енергію? завжди мають кінетичну енергію? **2.** Що називають внутрішньою енергією тіла? **3.** Від чого залежить внутрішня енергія тіла? **4.** Поки лід плавиться, його температура не змінюється. Чи змінюється при цьому внутрішня енергія льоду? **5.** Чи може тіло мати внутрішню енергію, але не мати при цьому механічної енергії?

Вправа № 3

1. Якщо підняти камінь з поверхні землі, то потенціальна енергія каменя, а отже, кожної його частинки збільшується. Чи означає це, що внутрішня енергія каменя також збільшується? Обґрунтуйте свою відповідь.

2. М'яч кинули вгору. Як під час руху м'яча змінюється його внутрішня енергія? механічна енергія? Опором повітря знехтуйте.

3. Як змінюються внутрішня й механічна енергії пляшки з водою у вашому наплічнику, коли ви в морозну погоду заходите з вулиці в теплий будинок? піднімаєтеся на другий поверх будівлі? прискорюєте рух шкільним коридором?
4. Металеву кульку підвісили на мотузці й нагріли. Як змінилася внутрішня енергія кульки? механічна енергія кульки?

5. Установіть відповідність між механічною енергією та формулою для її визначення.

1	Кінетична енергія	**А**	mgh
2	Потенціальна енергія піднятого тіла	**Б**	Fl
3	Повна механічна енергія	**В**	$E_k + E_p$
		Г	$mv^2/2$

§ 4. СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

Згадайте, як діти повертаються до школи після того, як на перерві грали в сніжки. Хтось енергійно тре руки, хтось тулить їх до теплої батареї. Для чого вони це роблять? Щоб зігріти змерзлі руки! А чим відрізняються способи нагрівання за допомогою тертя та через контакт із тілом, яке має вищу температуру?

1 Знайомимося з процесом теплопередачі та поняттям кількості теплоти

Згадаємо деякі приклади з життя: якщо вимкнути з розетки гарячу праску, за якийсь час вона охолоне (рис. 4.1); занурена в гарячий чай холодна ложка обов'язково нагрівається. У кожному із цих прикладів змінюється температура тіл, і це означає, що змінюється їхня внутрішня енергія. Водночас над цими тілами не виконується робота й самі тіла також ніякої роботи не виконують. У таких випадках кажуть про *передачу тепла*.

Процес зміни внутрішньої енергії тіла без виконання роботи називають **теплопередачею (теплообміном)**.

Для кількісної характеристики теплопередачі використовують поняття *кількість теплоти*.

Кількість теплоти — це фізична величина, що дорівнює енергії, яку тіло одержує або віддає під час теплопередачі.

Кількість теплоти позначають символом Q. *Одиниця кількості теплоти в СІ* — **джоуль** (Дж)*:

$$[Q] = 1 \text{ Дж}.$$

* Для вимірювання кількості теплоти здавна застосовували таку одиницю, як *калорія* (від латин. *calor* — тепло). Зараз цю одиницю часто використовують для обчислення енергії, що виділяється в результаті засвоєння їжі: 1 кал = 4,2 Дж.

Рис. 4.1. Вимкнена гаряча праска холоне — передає певну кількість теплоти навколишньому середовищу, доки не встановиться теплова ріновага

Рис. 4.2. Бенджамін Томпсон (граф Румфорд) (1753–1814), англійський фізик. Наприкінці XVIII ст. він уперше експериментально показав, що теплота — це енергія, яку можна одержати за рахунок виконання роботи

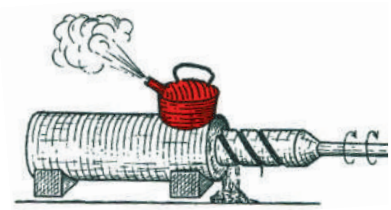


Рис. 4.3. Схема експерименту Румфорда: вода в казані, поставленому на заготівку гарматного дула, закипає під час свердління дула

Кількість теплоти, як і механічна робота, може бути як додатною, так і від'ємною. У випадках, коли тіло одержує енергію, кількість отриманої ним теплоти вважають додатною; коли тіло віддає енергію, кількість втраченої ним теплоти вважають від'ємною.

Досліди свідчать: *теплопередача є можливою тільки в разі наявності різниці температур, причому самовільно тепло може передаватися тільки від тіла з більшою температурою до тіла з меншою температурою.*

Чим більшою є різниця температур, тим швидше за інших рівних умов здійснюється передача тепла. Теплопередача триватиме, доки температури тіл не стануть однаковими, тобто доки між тілами не встановиться *теплова рівновага*.

2 Змінюємо внутрішню енергію, виконуючи роботу

Численні спостереження й експерименти переконують: навіть *у разі відсутності теплообміну внутрішня енергія тіла може збільшуватись, якщо над тілом виконується робота.* Першим це довів англійський фізик *Бенджамін Томпсон* (рис. 4.2, 4.3).

Так, робота сил тертя шин автомобіля об дорожнє покриття спричиняє збільшення внутрішньої енергії шин та покриття дороги. Доказ цього — їхнє нагрівання під час руху автомобіля. Так само, якщо інтенсивно терти долоні одну об одну, їхня внутрішня енергія збільшується (рис. 4.4).

З описаним явищем доводиться мати справу в техніці. Наприклад, у процесі оброблення металевих деталей через роботу сил тертя помітно зростає температура як самого інструмента (свердла, різця тощо), так і деталі, яку обробляють.

Розгляньте рис. 4.3 і поясніть, чому закипає вода в казані.

А як змінюється внутрішня енергія тіла, якщо воно саме́ виконує роботу? Проведемо дослід.

Візьмемо товстостінну скляну посудину, дно якої вкрите шаром води. Оскільки вода випаровується, в посудині буде водяна пара. Закоркуємо посудину і через корок пропустимо трубку. Сполучимо трубку з насосом та почнемо накачувати до посудини повітря.

Через деякий час корок вилетить, при цьому в посудині з'явиться туман — дрібні краплинки води, що утворилися з водяної пари (рис. 4.5). Поява туману відбувається в разі зниження температури. Отже, температура повітря в посудині зменшилася, відповідно зменшилася внутрішня енергія повітря. Таким чином, повітря виконало механічну роботу (виштовхнуло корок) за рахунок власної внутрішньої енергії. *Якщо тіло саме́ виконує роботу, то його внутрішня енергія зменшується.*

Рис. 4.4. Якщо інтенсивно потерти долоні одна об одну, вони розігріваються — їхня внутрішня енергія збільшується внаслідок виконання роботи

Підбиваємо підсумки

Існують два способи зміни внутрішньої енергії тіла: виконання роботи та теплопередача.

Процес зміни внутрішньої енергії тіла без виконання роботи називають теплопередачею. Енергія в процесі теплопередачі може самовільно передаватися тільки від тіла з більшою температурою до тіла з меншою температурою.

Кількість теплоти — це фізична величина, що дорівнює енергії, яку тіло одержує або віддає під час теплопередачі. Кількість теплоти позначають символом Q і вимірюють у джоулях (Дж).

Якщо за відсутності теплообміну над тілом виконують роботу, внутрішня енергія тіла збільшується, а якщо ж тіло саме́ виконує роботу, його внутрішня енергія зменшується.

Рис. 4.5. Дослід, який підтверджує, що в ході виконання повітрям роботи його внутрішня енергія зменшується. Доказом цього є поява туману в посудині

Контрольні запитання

1. У які способи можна змінити внутрішню енергію тіла? **2.** Що називають теплопередачею? **3.** Наведіть приклади теплопередачі. **4.** Що таке кількість теплоти? **5.** Назвіть одиницю кількості теплоти. **6.** Наведіть приклади зміни внутрішньої енергії тіла внаслідок виконання роботи. **7.** Як змінюється внутрішня енергія тіла у випадку, коли воно виконує роботу? у випадку, коли над тілом виконують роботу? Вважайте, що теплообмін із навколишніми тілами відсутній.

Вправа № 4

1. Чим відрізняються способи нагрівання рук за допомогою тертя та внаслідок взаємодії з тілом, яке має вищу температуру?
2. Наведіть два способи запалювання сірника: а) виконанням роботи; б) теплопередачею.
3. Чому військові, що десантуються з гелікоптерів по канатах, надягають рукавички?
4. Чи істинним є твердження, що під час теплопередачі енергія завжди передається від тіла з більшою внутрішньою енергією до тіла з меншою внутрішньою енергією? Свою відповідь обґрунтуйте.
5. Наведіть приклади зміни внутрішньої енергії тіла, коли водночас виконується робота та відбувається теплопередача. Чи може в таких випадках внутрішня енергія залишитися незмінною?
6. Згадайте та запишіть основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

Експериментальне завдання

«*Водяний коктейль*». Налийте в посудину невелику кількість води кімнатної температури. Виміряйте температуру води. Міксером змішуйте воду близько 1 хв. Знову виміряйте температуру води. Зробіть висновок.

§ 5. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

Навіщо жителі спекотних районів Центральної Азії влітку носять ватяні халати? Як зробити, щоб морозиво в літню спеку швидко не розтануло, якщо поблизу немає холодильника? У якому взутті швидше змерзнуть ноги — в тому, яке щільно прилягає до ноги, чи в просторому? Після вивчення матеріалу цього параграфа ви зможете правильно відповісти на всі ці запитання.

1 Знайомимося з механізмом теплопровідності

Проведемо дослід. Закріпивши в лапці штатива мідний стрижень, за допомогою воску прикріпимо вздовж стрижня кілька канцелярських кнопок. Почнемо нагрівати вільний кінець стрижня в полум'ї пальника. Через деякий час побачимо, що кнопки по черзі падатимуть на стіл (рис. 5.1).

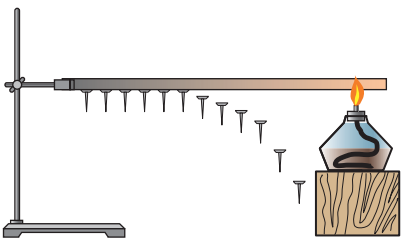


Рис. 5.1. Дослід, який демонструє теплопровідність металів

Для пояснення цього явища скористаємося знаннями з молекулярно-кінетичної теорії. Частинки в металах увесь час рухаються: йони коливаються навколо положень рівноваги; рух вільних електронів нагадує рух молекул газу. Коли кінець

стрижня поміщують у полум'я пальника, ця частина стрижня розігрівається. Швидкість руху частинок металу, які перебувають власне в полум'ї, збільшується. Ці частинки взаємодіють із сусідніми частинками і «розгойдують» їх. У результаті підвищується температура наступної частини стрижня й так далі. Образно кажучи, уздовж стрижня йде «потік» тепла, який послідовно розігріває метал. Енергія від металу передається до воску, він розм'якшується, і через це кнопки одна за одною відпадають від стрижня. *Зверніть увагу:* в ході цього процесу сама речовина (мідь) не переміщується від одного кінця стрижня до іншого.

Теплопровідність — це вид теплопередачі, який зумовлений хаотичним рухом і взаємодією частинок речовини й не супроводжується перенесенням цієї речовини.

2 Переконуємося, що різні речовини мають різну теплопровідність

Ви, напевно, помічали, що одні речовини проводять тепло краще, ніж інші. Так, якщо помістити в склянку з гарячим чаєм дві чайні ложки — сталеву та мідну, то мідна нагрівається набагато швидше. Це означає, що мідь краще проводить тепло, ніж сталь.

Досліди показали, що найкращими провідниками тепла є метали. Деревина, скло, чимало видів пластмас проводять тепло значно гірше, саме тому ми можемо, наприклад, тримати запалений сірник доти, доки полум'я не торкнеться пальців (рис. 5.2, *а*).

Погано проводять тепло й рідини (винятком є розплавлені метали). Проведемо дослід. Покладемо на дно пробірки з холодною водою шматочок льоду, а щоб лід не спливав, притиснемо його важком (рис. 5.2, *б*). Нагріватимемо на спиртівці верхній шар води. Через певний час вода поблизу поверхні закипить, а лід унизу пробірки ще не розтане.

Ще гірше за рідину проводять тепло гази. І це легко пояснити. Відстань між молекулами газів набагато більша, ніж відстань між молекулами рідин і між молекулами твердих тіл. Отже, зіткнення частинок і, відповідно, передавання енергії від однієї частинки до іншої відбуваються рідше.

Скловолокно, вата, хутро дуже погано проводять тепло, оскільки, по-перше, між їхніми волокнами є повітря, по-друге, ці волокна погано проводять тепло самі по собі.

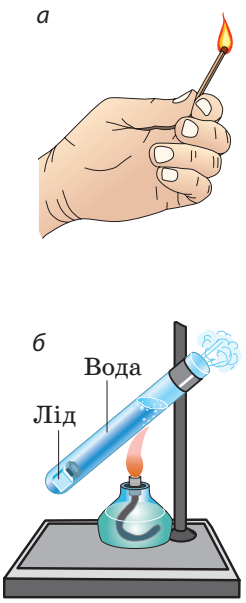


Рис. 5.2. Досліди, які ілюструють низьку теплопровідність деревини *(а)* та води *(б)*

Розгляньте рис. 5.3, 5.4. Поясніть, чому окремі деталі кухонного начиння виготовлені з різних матеріалів. Чому будинки будують з деревини або цегли? Чому підкладки курток заповнюють пухом?

Рис. 5.3. Там, де потрібно швидко передати тепло, застосовують речовини з високою теплопровідністю

Рис. 5.4. Щоб зменшити охолодження тіл (або зменшити їх нагрівання), застосовують речовини з низькою теплопровідністю

3 Звертаємо увагу на теплопровідність у природі, в житті людини

Ви, напевно, знаєте, що свійські тварини навесні та восени линяють. Навесні хутро тварин стає коротшим і менш густим, восени ж, навпаки, — довшає та густішає. Вовна, хутро, пух погано проводять тепло й надійно захищають тіла тварин від охолодження.

Тварини, що живуть або полюють у холодних морях, мають під шкірою товстий жировий прошарок, який завдяки слабкій теплопровідності дозволяє їм тривалий час перебувати у воді без значного переохолодження.

Багато комах узимку закопуються глибоко в землю — її гарні теплоізоляційні властивості дозволяють комахам вижити навіть у сильні морози. Деякі рослини пустелі вкриті дрібними ворсинками: нерухоме повітря між ними перешкоджає теплообміну з довкіллям.

Людина в різних сферах діяльності застосовує ті чи інші речовини, зважаючи на їхню теплопровідність. Речовини з кращою теплопровідністю застосовують там, де потрібно швидко передати тепло від одного тіла до іншого. Наприклад, каструлі, сковорідки, батареї опалення тощо виготовляють із металів.

Там, де потрібно запобігти нагріванню або охолодженню тіл, застосовують речовини, що погано проводять тепло. Наприклад, дерев'яна ручка джезви дозволить налити каву, не використовуючи рукавичок, а у водогінних трубах, які прокладено глибоко під землею, вода не замерзне й у сильні холоди і т. д.

Підбиваємо підсумки

Теплопровідність — це вид теплопередачі, який зумовлений хаотичним рухом і взаємодією частинок речовини й не супроводжується перенесенням цієї речовини.

Різні речовини та речовини в різних агрегатних станах по-різному проводять тепло. Одними з найкращих теплопровідників є метали, найгіршими — гази. Люди широко використовують у своїй життєдіяльності здатність речовин по-різному проводити тепло.

Контрольні запитання

1. Що називають теплопровідністю? **2.** Опишіть дослід, який демонструє, що метали добре проводять тепло. **3.** Як відбувається передавання енергії в разі теплопровідності? **4.** У якому стані речовина гірше проводить тепло — у твердому, рідкому чи газоподібному? **5.** Чому тварини не замерзають навіть у досить сильний холод? **6.** Які матеріали добре проводять тепло? Де їх застосовують? **7.** Назвіть матеріали, які погано проводять тепло. Де їх застосовують?

Вправа № 5

1. Чому з точки зору фізики вираз «шуба гріє» є неправильним?

2. Чому подвійні рами у вікнах сприяють кращій теплоізоляції?

3. Чому під соломою сніг довго не тане?

4. Чому безсніжними зимами озимина потерпає від морозів?

5. За кімнатної температури металеві речі на дотик здаються холоднішими, ніж дерев'яні. Чому? За якої умови металеві предмети здаватимуться на дотик теплішими, ніж дерев'яні? однаковими з ними за температурою?

6. Повітряна куля перебуває на певній висоті. Як поводитиметься куля, якщо температуру повітря всередині кулі збільшити? зменшити?

Експериментальне завдання

«*Гріємо лід*». Візьміть два шматочки льоду, кожний покладіть в окремий поліетиленовий пакет. Один із пакетів ретельно обмотайте ватою або махровим рушником. Покладіть пакети на тарілки та поставте їх у шафу. За годину розгорніть пакети. Поясніть результат.

Фізика і техніка в Україні

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ) — один із найбільших науково-технічних матеріалознавчих центрів Європи.

Ініціатор створення (1961 р.) інституту та його перший директор — *Валентин Миколайович Бакуль* (1908–1978). В основу розробки технології отримання надтвердих матеріалів були покладені роботи академіка *Л. Ф. Верещагіна*.

В інституті створено нові напрями сучасного матеріалознавства: синтез великих надміцних кристалів алмазу різного кольору, одержання алмазних і алмазоподібних плівок і покриттів з особливими властивостями, високотемпературна кераміка, комп'ютерне матеріалознавство. Розробки інституту застосовують у машинобудуванні, будівельній індустрії, видобутку й обробці природного каменю, геологорозвідувальному бурінні, електроніці, оптиці, медицині.

Від 1995 р. інститут є провідною організацією науково-технологічного алмазного концерну АЛКОН, продукція якого має попит як в Україні, так і в багатьох країнах світу.

§ 6. КОНВЕКЦІЯ

Уявіть спекотний літній полудень, берег моря. Вода на поверхні тепла, а її нижні шари прохолодні. Від води віє легкий вітерець. А чи знаєте ви, чому виникає той вітерець, адже трохи далі від води дерева навіть не поворухнуться? І чому нагрівся тільки верхній шар води, адже сонце пече вже досить довго? Спробуємо відповісти на ці запитання та низку інших.

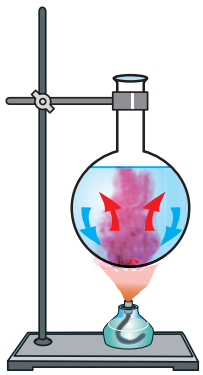


Рис. 6.1. Дослід, який демонструє конвекцію в рідині. Теплі забарвлені струминки води піднімаються, а холодні — опускаються

1 Спостерігаємо конвекцію в рідинах і газах

Ви вже знаєте, що гази й рідини погано проводять тепло. А чому ж тоді нагрівається повітря в кімнаті від радіаторів водяного опалення? Чому нагрівається вода в каструлі, яку поставлено на ввімкнену плиту? Чому охолоджується напій, якщо в нього покласти кубик льоду?

Щоб відповісти на ці запитання, звернемося до дослідів.

Круглодонну колбу наповнимо на три чверті водою й закріпимо в лапці штатива. Скляною паличкою покладемо на дно колби кілька дрібок акварельної фарби. Потім нагріватимемо колбу знизу. Через деякий час із дна колби почнуть підніматися забарвлені струминки води. Досягши верхніх шарів води, струминки спускатимуться вздовж холодніших боків колби (рис. 6.1); далі процес повториться. У результаті відбудеться природне перемішування нагрітих і ненагрітих частин рідини.

Аналогічний процес може бути й в газах. Щоб у цьому переконатися, достатньо потримати долоню над гарячою електроплитою або ввімкненою електричною лампою розжарення. Потоки гарячого повітря, що піднімаються, навіть можуть обертати легку вертушку (рис. 6.2).

У наведених прикладах спостерігаємо ще один вид теплопередачі — *конвекцію*.

Конвекція — це вид теплопередачі, який здійснюється шляхом перенесення енергії потоками рідини або газу.

Зверніть увагу: *конвекція не може відбуватись у твердих тілах*, оскільки в твердих тілах не можуть виникнути потоки речовини.

Рис. 6.2. Висхідні потоки гарячого повітря, діючи на легку металеву вертушку, надають їй досить швидкого руху

2 Знайомимося з механізмом конвекції

З'ясуємо причини виникнення *природної конвекції*. Для цього подумки виділимо невеликий об'єм рідини в посудині, яка розміщена над пальником.

Ви знаєте: на будь-яке тіло, що міститься всередині рідини (або газу), діють сила тяжіння та архімедова сила. Ті самі сили діють на будь-який невеликий об'єм власне рідини (рис. 6.3). Як відомо, в разі підвищення температури рідина розширюється, її густина зменшується й архімедова сила, що діє на виділений об'єм рідини, стає більшою, ніж сила тяжіння. Унаслідок цього нагріта рідина (яка має меншу густину) спливає, а холодна рідина (яка має більшу густину) опускається.

Аналогічні міркування справджуються й для газів.

Часто природне перемішування шарів рідини або газу є неможливим або недостатнім. У такому разі вдаються до їх штучного перемішування — *примусової конвекції* (рис. 6.4). Примусове перемішування повітря здійснюють, наприклад, у космічному кораблі, в умовах невагомості, де не діє архімедова сила.

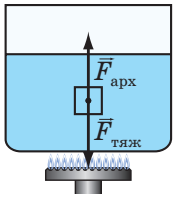


Рис. 6.3. На будь-який невеликий об'єм рідини діють сила тяжіння та виштовхувальна (архімедова) сила

Рис. 6.4. Вода в посудині нагрівається завдяки природній конвекції. Для більш рівномірного прогрівання, наприклад, густої каші господиня вдається до примусової конвекції — перемішує кашу ложкою

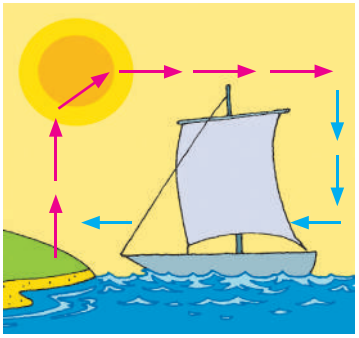
3 Спостерігаємо конвекцію в природі та використовуємо її в повсякденні

Природна конвекція має дуже велике значення в природі й широко застосовується людиною.

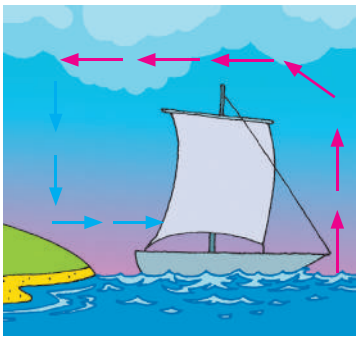
З курсу географії вам відомо, що одним із чинників, які впливають на клімат Землі, є вітри. А чи знаєте ви, що однією з основних причин появи вітрів на планеті є конвекція (рис. 6.5)?

Розглянемо, наприклад, як утворюється *бриз* — вітер, що виникає поблизу берега моря чи великого озера. Удень суходіл прогрівається швидше за воду, тому температура повітря над суходолом вища, ніж над поверхнею води. Повітря над суходолом розширюється, його густина зменшується, і повітря підіймається.

Рис. 6.5. Сильні вітри — це потужні конвекційні потоки (І. К. Айвазовський «Дев'ятий вал»)



а



б

Рис. 6.6. Утворення бризів — денних і нічних — пояснюється конвекцією: *а* — денний (морський) бриз; *б* — нічний (береговий) бриз

У результаті тиск над суходолом падає і холодне повітря з водойми починає низом переміщуватися до суходолу — виникає *денний (морський) бриз* (рис. 6.6, *а*).

Спробуйте пояснити, як утворюється *нічний (береговий) бриз* (рис. 6.6, *б*). *Підказка*: суходіл холоне швидше за воду.

Через нерівномірне нагрівання води виникають постійні течії в морях і океанах. Океанські течії, як і вітри, відіграють значну роль у формуванні клімату на нашій планеті.

З конвекцією ми часто маємо справу й у повсякденному житті. Так, унаслідок конвекції здійснюється обігрівання (рис. 6.7) та охолодження помешкань. Завдяки конвекції нагріваються вода в чайнику та їжа в каструлі. Створення тяги також є проявом конвекції (рис. 6.8). Повітря в печі нагрівається і розширюється, його густина зменшується, і тепле повітря прямує вгору, у трубу. У результаті тиск повітря навколо дров і в трубі зменшується й стає меншим за тиск у кімнаті; завдяки цьому збагачене киснем холодне повітря струмує до дров.

Підбиваємо підсумки

Конвекція — це вид теплопередачі, що здійснюється шляхом перенесення енергії потоками рідини або газу. У твердих речовинах цей вид теплопередачі неможливий. Розрізняють природну і примусову конвекції.

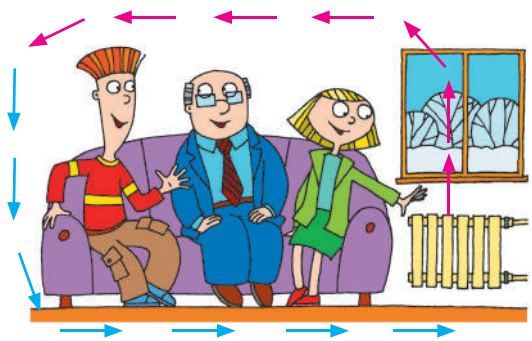


Рис. 6.7. Невеликий тепловий радіатор завдяки конвекції обігріває все приміщення

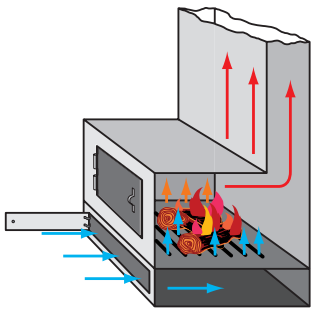


Рис. 6.8. Створення тяги: збагачене киснем холодне повітря потрапляє до печі завдяки конвекції

Природну конвекцію можна пояснити наявністю архімедової сили та явищем теплового розширення. Теплі шари рідини або газу прямують угору (вони мають меншу густину), а холодні (більшої густини) — опускаються.

Контрольні запитання

1. Опишіть дослід на доведення того, що в процесі нагрівання теплі потоки рідини піднімаються, а холодні — опускаються. **2.** Що таке конвекція? **3.** Чим відрізняється конвекція від теплопровідності? **4.** Назвіть причини виникнення природної конвекції. **5.** Чи можлива конвекція в речовинах, які перебувають у твердому стані? Обґрунтуйте свою відповідь. **6.** Що називають примусовою конвекцією? **7.** Наведіть приклади проявів конвекції в природі та в житті людини.

Вправа № 6

1. Чому язики полум'я підіймаються?
2. Чому влітку вода в річці на глибині холодніша, ніж на поверхні?
3. Де краще розмістити посудину з водою, щоб швидше її нагріти: над нагрівником, під нагрівником чи збоку від нього? Де краще розмістити балон із водою, щоб швидше охолодити в ньому воду за допомогою льоду: на льоду, під льодом чи поряд із ним? Відповіді аргументуйте.
4. Чому не падають хмари? Чому град зазвичай випадає влітку, спекотного дня?
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, як застосовують явище конвекції в техніці. Підготуйте коротку презентацію.
6. У рідинному манометрі, ліве коліно якого відкрите в атмосферу, міститься вода (рис. 1). Який тиск більший — атмосферний чи тиск у балоні? На скільки відрізняється тиск у балоні від атмосферного?

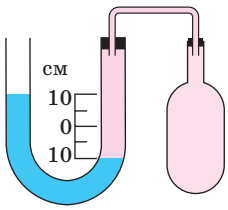


Рис. 1

Експериментальні завдання

1. Під наглядом дорослих запаліть свічку та дослідіть напрямок конвекційних потоків уздовж відчинених дверей (див. рис. 2). Поясніть результати спостереження.
2. Виріжте з тонкого паперу прямокутник, зігніть його по середніх лініях і знову розправте. Потім закріпіть на гумці швацьку голку вістрям догори й покладіть на вістря підготований аркушик (див. рис. 3). Обережно наблизьте розкриту долоню до аркушика. Він почне обертатися. Відведіть долоню — аркушик зупиниться. Покажіть фокус друзям і поясніть явище. (*Підказка*: температура долоні не скрізь однакова.)

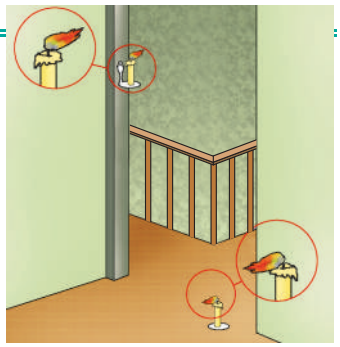


Рис. 2

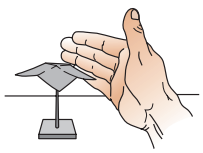


Рис. 3

§ 7. ВИПРОМІНЮВАННЯ

Основа нашого життя — обмін енергією. Здебільшого енергія потрапляє на Землю від Сонця (рис. 7.1). Листя, що розпускається навесні під сонячним промінням, вітри й течії, які виникають унаслідок різниці температур прогрітих Сонцем ділянок Землі, «використовують» сонячну енергію сьогодення. А такі джерела теплової енергії, як нафта, газ, вугілля, «виросли» під сонячними променями глибокої давнини. Але як енергія від Сонця потрапляє на Землю, адже між цими космічними об'єктами практично немає молекул, тобто ані про теплопровідність, ані про конвекцію не може бути й мови?

Рис. 7.1. Сонце щосекунди випромінює в навколишній простір колосальну кількість енергії, певна частина якої потрапляє на Землю

1 Знайомимося з випромінюванням

Якщо розміститися біля відкритого вогню (багаття, пічки тощо), можна відчути, що обличчя та інші ділянки тіла нагріваються. Це означає, що від вогню передається певна кількість теплоти.

А як передається ця енергія?

Ми *спостерігаємо*, що язики полум'я піднімаються (якщо це багаття) чи спрямовуються в трубу (якщо це піч або камін), отже, туди ж рухається й тепле повітря. Звідси перший висновок: стоячи біля вогню, ми отримуємо енергію *не* завдяки конвекції (рис. 7.2).

Зробимо *припущення*: можливо, енергія передається завдяки теплопровідності. Щоб перевірити це припущення, помістимо біля вогню лист металу (рис. 7.3, *а*). Він надійно захистить від жару незважаючи на те, що метал добре проводить тепло. А от прозоре скло (рис. 7.3, *б*), хоча воно і є гарним теплоізолятором, захищає від жару менше, ніж

Рис. 7.2. Спостереження підтверджують, що, стоячи біля відкритого вогню, ми одержуємо енергію *не* в результаті конвекції

а *б*

Рис. 7.3. Метал, який добре проводить тепло, краще захищає від гарячого полум'я, ніж скло, що є поганим теплопровідником

непрозорий метал. Робимо другий висновок: тепло від відкритого вогню передається не тільки завдяки теплопровідності.

Отже, маємо справу ще з одним видом теплопередачі — *випромінюванням*.

Випромінювання — це вид теплопередачі, в ході якого енергія передається за допомогою променів (електромагнітних хвиль).

2 Виявляємо деякі особливості теплового випромінювання

Електромагнітні хвилі поширюються навіть у вакуумі, тому випромінювання відрізняється від інших видів теплопередачі тим, що енергія може передаватися через простір, у якому відсутня речовина. Наприклад, енергія від Сонця до Землі й інших планет передається тільки завдяки випромінюванню. Однак неправильно вважати, що випромінювання відіграє важливу роль тільки в космосі. *Випромінювання — це універсальний вид теплопередачі, воно відбувається між усіма тілами.*

Згадайте, в якому одязі — світлому чи темному — ви краще почуваєтесь у літню спеку. Яку поверхню — світлу чи темну — сильніше нагрівають сонячні промені? Поміркуйте, як залежить здатність тіла поглинати теплове випромінювання від кольору цього тіла.

Щоб перевірити правильність вашої відповіді, скористаємося *теплоприймачем* (рис. 7.4). Закріпимо його в муфті штатива та сполучимо з рідинним манометром. До чорного боку теплоприймача піднесемо гарячу електричну праску (рис. 7.5, *а*). Рівень рідини в коліні манометра, сполученому з теплоприймачем, знизиться. Це означає, що повітря в коробочці нагрілось і його тиск збільшився.

Повернемо теплоприймач до праски полірованою поверхнею — у цьому випадку різниця рівнів рідини в колінах манометра буде

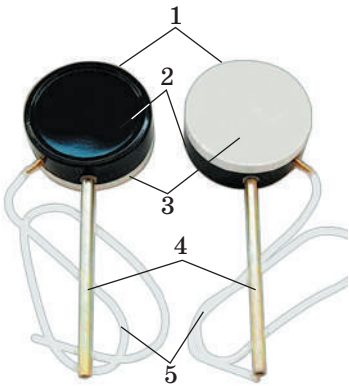


Рис. 7.4. Теплоприймач:
1 — порожня коробочка;
2 — темна поверхня;
3 — біла або світла відполірована поверхня;
4 — ручка;
5 — трубка для сполучення з рідинним манометром

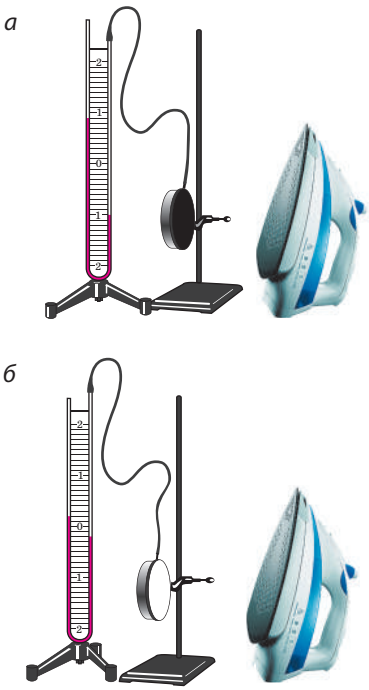


Рис. 7.5. Дослід, який демонструє, що здатність тіла поглинати енергію випромінювання залежить від кольору поверхні тіла

набагато меншою (рис. 7.5, *б*), тобто повітря в теплоприймачі нагріється менше.

Тіла з темною поверхнею краще поглинають теплове (інфрачервоне) випромінювання, ніж тіла зі світлою або полірованою поверхнею.

За допомогою схожих дослідів також з'ясовано, що *тіла з темною поверхнею не тільки краще поглинають тепло, але й активніше його випромінюють.*

Слід додати, що всі тіла за будь-якої температури обмінюються енергією завдяки випромінюванню. Тобто *будь-яке тіло водночас і випромінює, і поглинає тепло.* Якщо температура тіла більша за температуру тіл навколо, то воно випромінює енергії більше, ніж поглинає. Якщо ж тіло холодніше за навколишні тіла, то енергія, яку воно поглинає, буде більшою, ніж випромінювана. Отже, *випромінювання, як і будь-який інший вид теплопередачі, врешті-решт веде до теплової рівноваги.*

Підбиваємо підсумки

Вид теплопередачі, в ході якого енергія передається за допомогою електромагнітних хвиль, називають випромінюванням.

Випромінювання — це універсальний вид теплопередачі, воно відбувається між усіма тілами (навіть коли тіла перебувають у вакуумі).

Енергія, яку випромінює і поглинає тіло, залежить від кольору його поверхні. Сильніше випромінюють і краще поглинають енергію тіла з темною поверхнею. Тіла світлих і сріблястих кольорів, навпаки, гірше і випромінюють, і поглинають енергію.

Контрольні запитання

1. Чому енергія від Сонця до Землі не може передаватися завдяки конвекції та теплопровідності? **2.** Опишіть дослід на підтвердження того, що енергія від багаття може передаватися не тільки завдяки теплопровідності. **3.** Що таке випромінювання? **4.** Тіла якого кольору краще поглинають тепло? Опишіть дослід на підтвердження вашої відповіді. **5.** Чи існують умови, за яких тіло не випромінює і не поглинає енергію? **6.** Що відбувається з температурою тіла, коли це тіло випромінює енергії більше, ніж поглинає?

Вправа № 7

1. Чому опалювальні батареї краще фарбувати в темний колір?
2. У який колір краще фарбувати фургони рефрижераторів?
3. Чому навесні забруднений сніг тане швидше, ніж чистий?
4. Узимку в неопалюваному приміщенні, вікна якого «дивляться» на південь, досить тепло. Коли таке може бути? Чому?
5. Для чого між стінками колби в термосах відкачують повітря, а поверхню колби роблять дзеркальною?
6. Атмосфера Землі прозора, тому сонячні промені проходять крізь атмосферу, майже не нагріваючи її. А завдяки чому нагрівається атмосферне повітря і від чого залежіть ступінь його нагрітості?

7. Заповніть таблицю*.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця в СІ
	m	
		°C
		кг/м^3
Кількість теплоти		

§ 8. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ РЕЧОВИНИ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ, ЩО ПОГЛИНАЄТЬСЯ РЕЧОВИНОЮ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ АБО ВИДІЛЯЄТЬСЯ ПІД ЧАС ОХОЛОДЖЕННЯ

На запитання: «Що швидше нагрівається — 200 чи 300 грамів рідини?» — хтось швиденько відповість, що двісті: зрозуміло ж бо, що триста грамів нагріватимуться довше. І ця відповідь, можливо, буде правильною, а можливо — ні. Отже, не кваптеся з висновками, з'ясуємо все послідовно.

1 З'ясовуємо, від чого залежить кількість теплоти, необхідна для нагрівання

Якщо в однакові посудини налити дві рідини масами 200 і 300 г і за допомогою однакових нагрівників нагріти ці рідини від 20 до 100 °С, рідина якої маси нагрівається швидше?

Поміркуємо над цим запитанням. По-перше, є очевидним: якщо рідина та сама, наприклад вода, то для нагрівання 300 г рідини потрібно більше часу, а отже, і більша кількість теплоти, ніж для нагрівання 200 г. Це означає, що *кількість теплоти, необхідна для нагрівання речовини, збільшується зі збільшенням маси цієї речовини*.

Проте ми не знаємо, про які рідини йдеться в запитанні, і тому не можемо однозначно відповісти, яка з них нагрівається швидше. Адже *кількість теплоти, яку необхідно передати речовині для певної зміни її температури, залежить від того, яка це речовина*. Переконаємося в цьому це за допомогою досліду.

Візьмемо 200 г води і 200 г олії та нагріємо обидві рідини від 20 до 100 °С, вимірявши час нагрівання. Помітимо, що олія нагрівається швидше, а отже, одержить меншу кількість теплоти, ніж вода (рис. 8.1).

Поміркуйте, чи однакову кількість теплоти поглине речовина певної маси під час її нагрівання від 20 до 100 °С і під час її нагрівання від 20 до 40 °С. Якщо не однакову, то в якому випадку більшу? У скільки разів більшу?

* Сподіваємося, ви пам'ятаєте, що в таких завданнях ***таблиці, подані в підручнику, слід переносити до зошита***.

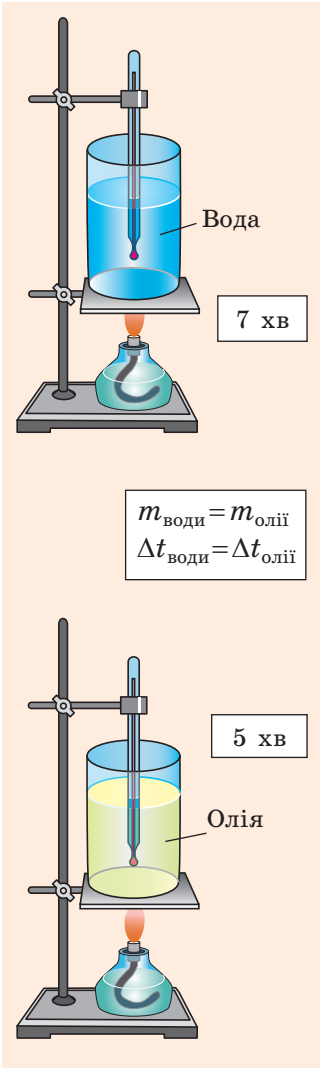


Рис. 8.1. Дослід з вивчення залежності кількості теплоти, необхідної для нагрівання речовини, від того, яка це речовина. Якщо нагрівати різні речовини однакової маси, то для однакової зміни їхньої температури потрібен різний час, тобто різна кількість теплоти

Змінюючи масу речовини, способи її нагрівання та охолодження, зважаючи на теплові втрати й намагаючись звести їх до мінімуму, вчені довели, що *кількість теплоти, яку поглинає речовина під час нагрівання або виділяє під час охолодження:*

— *залежить від того, яка це речовина*;

— *прямо пропорційна масі речовини;*

— *прямо пропорційна зміні температури речовини.* Це твердження записують формулою:

$$Q = cm\Delta t,$$

де Q — кількість теплоти; m — маса речовини; Δt — зміна температури; c — коефіцієнт пропорційності, що є характеристикою речовини і називається *питома теплоємність речовини.*

2 Даємо означення питомої теплоємності речовини

Питома теплоємність речовини — це фізична величина, що характеризує речовину і чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати речовині масою 1 кг, щоб нагріти її на 1 °С.

Питому теплоємність позначають символом c і визначають за формулою:

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

Із формули для визначення питомої теплоємності дістанемо її одиницю — **джоуль на кілограм-градус Цельсія***:

$$[c] = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}.$$

Питома теплоємність показує, на скільки джоулів змінюється внутрішня енергія речовини масою 1 кг *у разі зміни температури на* 1 °С, *якщо об'єм речовини залишається незмінним.*

* У СІ питому теплоємність вимірюють *у джоулях на кілограм-кельвін*; числові значення питомої теплоємності, поданої в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$ і $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, є однаковими.

3 Порівнюємо питомі теплоємності різних речовин

Питомі теплоємності різних речовин можуть суттєво різнитися. Так, питома теплоємність золота становить 130 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$, що означає: під час нагрівання 1 кг золота на 1 °С воно поглинає 130 Дж теплоти, а якщо 1 кг золота охолоне на 1 °С, то при цьому виділиться 130 Дж теплоти. Питома ж теплоємність соняшникової олії 1700 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$, тобто під час нагрівання 1 кг олії на 1 °С вона поглинає 1700 Дж теплоти, а в процесі охолодження 1 кг олії на 1 °С виділяється 1700 Дж теплоти.

Питома теплоємність речовини в різних агрегатних станах є різною. Наприклад, питома теплоємність води становить 4200 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$, льоду — 2100 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$; заліза у твердому стані — 460 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$, розплавленого заліза — 830 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$.

Значення питомих теплоємностей речовин визначають дослідним шляхом і заносять у таблиці (див. табл. 1 *Додатка* наприкінці підручника).

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Під час згоряння дров цегляна піч масою 2 т отримала 88 МДж теплоти і нагрілася від 10 до 60 °С. Визначте питому теплоємність цегли.

Аналіз фізичної проблеми. Для розв'язання задачі скористаємося формулою, що визначає питому теплоємність речовини.

Дано:
$m = 2000$ кг
$t_1 = 10^\circ\text{C}$
$t_2 = 60^\circ\text{C}$
$Q = 88$ МДж $= 88\,000\,000$ Дж

Знайти:
c — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Оскільки $c = \frac{Q}{m\Delta t}$, а $\Delta t = t_2 - t_1$, дістанемо:

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot(^\circ\text{C} - {}^\circ\text{C})} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}};$$

$$c = \frac{88\,000\,000}{2000(60-10)} = \frac{88\,000}{2\cdot 50} = 880\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}\right).$$

Аналіз результату. Одержане значення питомої теплоємності збігається з табличним, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $c = 880$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$.

Підбиваємо підсумки

Дослідним шляхом з'ясовано, що кількість теплоти, яку поглинає тіло під час нагрівання або виділяє під час охолодження, прямо пропорційна масі цього тіла, зміні його температури та залежить від речовини, з якої це тіло виготовлене (складається): $Q = cm\Delta t$.

Питомою теплоємністю речовини називають фізичну величину, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати цій речовині масою 1 кг, щоб нагріти її на 1 °С.

Питому теплоємність речовини позначають символом c і вимірюють у джоулях на кілограм-градус Цельсія $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}\right)$. Питому теплоємність можна визначити за формулою $c = \frac{Q}{m\Delta t}$ або знайти у відповідній таблиці.

Контрольні запитання

1. Від чого залежить кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла? **2.** За якою формулою обчислюють кількість теплоти, передану тілу під час нагрівання або виділену ним під час охолодження? **3.** Яким є фізичний зміст питомої теплоємності речовини? **4.** Назвіть одиницю питомої теплоємності речовини.

Вправа № 8

1. Питома теплоємність срібла дорівнює 250 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$. Що це означає?

2. Чому в системах охолодження найчастіше використовують воду?

3. Сталеву ложку масою 40 г нагріли в окропі (у воді за температури 100 °С). Яка кількість теплоти пішла на нагрівання ложки, якщо її температура збільшилася від 20 до 80 °С?

4. Щоб нагріти деталь масою 250 г на 160 °С, їй було передано 20 кДж теплоти. З якого матеріалу виготовлено деталь?

5. Як відомо, $c = \frac{Q}{m\Delta t}$. Чи можемо ми сказати, що питома теплоємність залежить від маси речовини? від зміни температури речовини? від кількості переданої теплоти?

6. В алюмінієвій каструлі масою 500 г нагріли 1,5 кг води від 20 °С до кипіння. Яку кількість теплоти передано каструлі з водою?

7. На яку висоту можна підняти вантаж масою 2 т, якщо вдалося б використати всю енергію, що звільняється під час остигання 0,5 л води від 100 до 0 °С ?

8. Оберіть на карті дві місцевості, розташовані на одній широті: одна має бути біля моря, а інша — в глибині континенту. Скориставшись додатковими джерелами інформації, зіставте перепади температур (день — ніч, зима — літо) у цих місцевостях. Поясніть отримані результати.

§ 9. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС

Вивчаючи механічні явища, ви вже ознайомились із законом збереження і перетворення енергії. Цей фундаментальний закон справджується для всіх процесів у природі, в тому числі для процесу теплопередачі. Математичним вираженням закону збереження енергії в процесі теплопередачі є рівняння теплового балансу. Ознайомимося із цим рівнянням і навчимося застосовувати його для розв'язування задач.

1 Запишемо рівняння теплового балансу

Уявіть систему тіл, яка не одержує і не віддає енергію (таку систему називають *ізольованою*), а зменшення або збільшення внутрішньої енергії тіл системи відбувається лише внаслідок теплопередачі між тілами цієї системи. У такому випадку на підставі закону збереження енергії можна стверджувати: скільки теплоти віддадуть одні тіла системи, стільки ж теплоти одержать інші тіла цієї системи.

Позначимо Q^+ кількість теплоти, одержану якимось тілом системи, а Q^- — модуль кількості теплоти, відданої якимось тілом цієї системи. Тоді закон збереження енергії для процесу теплопередачі можна записати у вигляді рівняння, яке називають **рівнянням теплового балансу**:

$$Q_1^- + Q_2^- + \ldots + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + \ldots + Q_k^+ ,$$

де n — кількість тіл, що віддають енергію; k — кількість тіл, що отримують енергію.

Формулюється воно так: *в ізольованій системі тіл, у якій внутрішня енергія тіл змінюється тільки внаслідок теплопередачі, загальна кількість теплоти, віддана одними тілами системи, дорівнює загальній кількості теплоти, одержаної іншими тілами цієї системи.*

Зауважимо, що в наведеній формі рівняння теплового балансу всі доданки є модулями кількості теплоти, тобто є величинами додатними.

Рівняння теплового балансу застосовують для розв'язання низки задач, із якими ми часто маємо справу на практиці (рис. 9.1).

Рис. 9.1. Деякі приклади застосування рівняння теплового балансу до розв'язування практичних задач: *а* — обчислення кількості гарячої води, яку треба додати в посудину з холодною водою, щоб отримати теплу воду заданої температури; *б* — визначення потужності нагрівника для підтримування в приміщенні комфортної температури

2 Учимося розв'язувати задачі

Розв'язуючи задачі на складання рівняння теплового балансу, слід пам'ятати: процес теплообміну зрештою приводить до стану теплової рівноваги, тобто *температури всіх тіл системи стають однаковими*.

Задача. У воду масою 400 г, узяту за температури 20 °С, додали 100 г гарячої води, що має температуру 70 °С. Якою буде температура води? Вважайте, що теплообмін із довкіллям не відбувається.

Аналіз фізичної проблеми. У теплообміні беруть участь два тіла. Віддає енергію гаряча вода: її температура зменшується від 70 °С до кінцевої температури t. Одержує енергію холодна вода: її температура збільшується від 20 °С до t. За умовою, теплообмін із довкіллям не відбувається, тому для розв'язання задачі можна скористатися рівнянням теплового балансу.

Дано:
$m_1 = 400\ \text{г} = 0{,}4\ \text{кг}$
$t_1 = 20\ ^\circ\text{C}$
$m_2 = 100\ \text{г} = 0{,}1\ \text{кг}$
$t_2 = 70\ ^\circ\text{C}$

Знайти:
t — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Кількість теплоти, одержана холодною водою*:

$$Q_1 = cm_1(t - t_1). \qquad (1)$$

Кількість теплоти, віддана гарячою водою:

$$Q_2 = cm_2(t_2 - t). \qquad (2)$$

Відповідно до рівняння теплового балансу:

$$Q_1 = Q_2. \qquad (3)$$

Підставивши рівняння (1) і (2) у рівняння (3), дістанемо:

$$cm_1(t - t_1) = cm_2(t_2 - t) \Rightarrow m_1(t - t_1) = m_2(t_2 - t).$$

Виконавши перетворення, отримаємо:

$$m_1 t - m_1 t_1 = m_2 t_2 - m_2 t.$$

Звідси:

$$m_1 t + m_2 t = m_2 t_2 + m_1 t_1 \Rightarrow t(m_1 + m_2) = m_2 t_2 + m_1 t_1.$$

Остаточно маємо: $t = \dfrac{m_2 t_2 + m_1 t_1}{m_1 + m_2}$.

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C} + \text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}{\text{кг} + \text{кг}} = \frac{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}{\text{кг}} = {}^\circ\text{C};\quad t = \frac{0{,}4\cdot 20 + 0{,}1\cdot 70}{0{,}4 + 0{,}1} = 30\ (^\circ\text{C}).$$

Аналіз результату. Одержане значення кінцевої температури води (30 °С) є цілком реальним: воно більше за 20 °С і менше від 70 °С.

Відповідь: $t = 30\ ^\circ\text{C}$.

* Нагадуємо: рівняння теплового балансу ми будемо використовувати у вигляді, де значення кількостей теплоти взяті за модулем, тобто є додатними. Тому тут і надалі, розраховуючи кількість теплоти, яку віддає або отримує тіло, завжди будемо віднімати від більшої температури меншу.

Підбиваємо підсумки

Для будь-яких процесів, що відбуваються в природі, виконується закон збереження і перетворення енергії. Для ізольованої системи, в якій внутрішня енергія тіл змінюється тільки внаслідок теплопередачі між тілами цієї системи, закон збереження енергії можна сформулювати так: загальна кількість теплоти, віддана одними тілами системи, дорівнює загальній кількості теплоти, одержаної іншими тілами цієї системи.

Математичним вираженням закону збереження енергії в процесі теплопередачі є рівняння теплового балансу:

$$Q_1^- + Q_2^- + \ldots + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + \ldots + Q_k^+ .$$

Контрольні запитання

1. Яку систему тіл називають ізольованою? **2.** Сформулюйте закон збереження енергії, на підставі якого складають рівняння теплового балансу.

Вправа № 9

У ході розв'язування задач теплообміном із довкіллям знехтуйте.

1. У ванну налито 80 л води за температури 10 °С. Скільки літрів води за температури 100 °С потрібно додати у ванну, щоб температура води в ній становила 25 °С? Теплообміном між ванною та водою знехтуйте.

2. У каструлю налили 2 кг води за температури 40 °С, а потім додали 4 кг води за температури 85 °С. Визначте температуру суміші. Теплообміном між каструлею та водою знехтуйте.

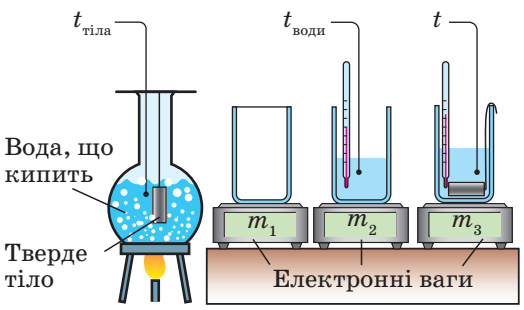
3. Нагрітий у печі сталевий брусок масою 200 г занурили у воду масою 250 г за температури 15 °С. Температура води підвищилася до 25 °С. Обчисліть температуру в печі.

4. Латунна посудина масою 200 г містить 400 г води за температури 20 °С. У воду опустили 800 г срібла за температури 69 °С. У результаті вода нагрілася до температури 25 °С. Визначте питому теплоємність срібла.

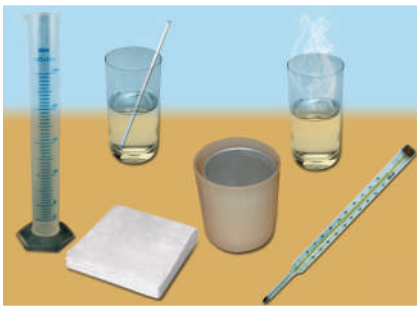
5. Наведіть приклади речовин, які за температури 20 °С перебувають у твердому стані; рідкому стані; газоподібному стані.

Експериментальне завдання

Скориставшись рисунком, складіть план проведення експерименту щодо визначення питомої теплоємності речовини, з якої виготовлено тверде тіло. Якщо ви маєте необхідне обладнання, проведіть відповідний експеримент за допомогою дорослих.



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

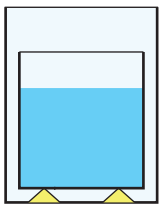


Тема. Вивчення теплового балансу за умови змішування води різної температури.

Мета: ознайомитися з будовою та принципом дії калориметра; визначити кількість теплоти, віддану гарячою водою, і кількість теплоти, одержану холодною водою, у результаті змішування води різної температури; порівняти результати.

Обладнання: мірний циліндр, термометр, калориметр, склянка з холодною водою, склянка з гарячою водою, паперові серветки, мішалка.

Теоретичні відомості



Для багатьох дослідів із вивчення теплових явищ застосовують *калориметр* — пристрій, що складається з двох посудин, які розміщені одна в одній і розділені повітряним прошарком (див. рисунок). Завдяки невеликій відстані між внутрішньою і зовнішньою посудинами, що зумовлює відсутність конвекційних потоків, а також унаслідок слабкої теплопровідності повітря теплообмін із довкіллям у калориметрі є незначним.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Підготовка до експерименту

1. Перед тим як розпочати вимірювання:
   а) уважно прочитайте теоретичні відомості, подані вище;
   б) згадайте, у чому полягає стан теплової рівноваги.
2. Визначте ціну поділки шкал вимірювальних приладів.

Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).
Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Ознайомтесь із будовою калориметра.
2. Налийте в мірний циліндр 60–80 мл холодної води. Визначте її об'єм (V_1) і виміряйте її температуру (t_1).
3. Налийте в калориметр гарячої води (1/3 внутрішньої посудини калориметра) і виміряйте її температуру (t_2).
4. Не виймаючи термометра, вилийте в калориметр холодну воду з мірного циліндра і, обережно перемішуючи суміш мішалкою, стежте за показами термометра. Щойно зміненння температури стане непомітним, запишіть температуру суміші (t).
5. Обережно вийміть термометр із води, протріть серветкою та покладіть у футляр.

6. Перелийте всю воду з калориметра в мірний циліндр, виміряйте загальний об'єм V води.

Опрацювання результатів експерименту

1. Визначте масу холодної води за формулою: $m_1 = \rho_{води} V_1$. За формулою $Q_1 = c_{води} m_1 (t - t_1)$ обчисліть кількість теплоти Q_1, одержану холодною водою.
2. Визначте об'єм V_2 і масу m_2 гарячої води: $V_2 = V - V_1$; $m_2 = \rho_{води} V_2$. За формулою $Q_2 = c_{води} m_2 (t_2 - t)$ обчисліть кількість теплоти Q_2, віддану гарячою водою.
3. Закінчіть заповнення таблиці.

Температура води, °C			Об'єм води, мл			Маса води, кг		Кількість теплоти, Дж	
t_1	t_2	t	V_1	V	V_2	m_1	m_2	Q_1	Q_2

Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому:

а) порівняйте кількість теплоти, віддану гарячою водою, і кількість теплоти, одержану холодною водою;

б) зазначте причину можливої розбіжності результатів.

Завдання «із зірочкою»

Оцініть відносну похибку експерименту, скориставшись формулою:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \right| \cdot 100\,\% .$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема. Визначення питомої теплоємності речовини.

Мета: визначити питому теплоємність речовини у твердому стані.

Обладнання: мірний циліндр, терези з важками, термометр, калориметр, металеве тіло з ниткою, склянка з водою кімнатної температури, електричний чайник із киплячою водою (один на клас), паперові серветки, мішалка.

Теоретичні відомості

Для визначення питомої теплоємності речовини в твердому стані можна скористатися таким методом. Тіло нагрівають в окропі, а потім опускають у калориметр із холодною водою. Відбувається теплообмін, у якому беруть участь чотири тіла: тверде тіло віддає енергію, одержують енергію вода, калориметр і термометр. Оскільки термометр і калориметр порівняно з водою одержують незначну кількість теплоти, можемо вважати, що кількість теплоти, віддана твердим тілом, дорівнює кількості теплоти, одержаної холодною водою: $Q_{\text{тіла}} = Q_{\text{води}}$. Отже, $c_{\text{тіла}} m_{\text{тіла}} (t_{\text{тіла}} - t) = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_{\text{води}})$; звідси:

$$c_{\text{тіла}} = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} \left(t - t_{\text{води}}\right)}{m_{\text{тіла}} (t_{\text{тіла}} - t)},$$

де $c_{\text{тіла}}$, $c_{\text{води}}$ — питомі теплоємності речовини, з якої складається тіло, та води; $m_{\text{тіла}}$, $m_{\text{води}}$ — маси тіла й води; $t_{\text{тіла}}$ і $t_{\text{води}}$ — температури тіла й води на початку досліду; t — температура тіла й води після встановлення теплової рівноваги.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Підготовка до експерименту

1. Перед тим як розпочати вимірювання:
   а) уважно прочитайте теоретичні відомості, подані вище;
   б) згадайте, що характеризує питома теплоємність речовини; одиницю питомої теплоємності речовин.
2. Визначте ціну поділки шкал вимірювальних приладів.

Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).
Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Налийте в мірний циліндр 100–150 мл води. Виміряйте об'єм води ($V_{\text{води}}$).
2. Перелийте воду з мірного циліндра в калориметр. Виміряйте початкову температуру води в калориметрі ($t_{\text{води}}$).
3. Вийміть термометр із води і покладіть на серветку. Підійдіть з калориметром до вчителя, який із чайника з киплячою водою дістане за нитку металеве тіло та покладе його у ваш калориметр.
4. Знову помістіть термометр у калориметр і, злегка перемішуючи воду мішалкою, стежте за підвищенням температури. Щойно змінення температури стане непомітним (тобто встановиться теплова рівновага), запишіть показ термометра — кінцеву температуру води (t).
5. Вийміть термометр із води, осушіть його паперовою серветкою та покладіть у футляр.
6. Вийміть металеве тіло з води, осушіть його паперовою серветкою та зважте ($m_{\text{тіла}}$).

Опрацювання результатів експерименту

1. Визначте масу води в калориметрі $\left(m_{\text{води}} = \rho_{\text{води}} V_{\text{води}}\right)$. Результат обчислень занесіть до таблиці.
2. Поміркуйте та заповніть стовпчики 5–7 таблиці.
3. Скориставшись формулою $c_{\text{тіла}} = \dfrac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_1)}{m_{\text{тіла}} (t_{\text{тіла}} - t)}$, визначте питому теплоємність металу, з якого виготовлено тіло ($c_{\text{тіла}}$).
4. Закінчить заповнення таблиці.
5. Скориставшись таблицею питомих теплоємностей деяких речовин у твердому стані (див. табл. 1 *Додатка*), дізнайтеся, з якого металу виготовлено тіло.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Початкова температура води $t_{\text{води}}$, °C	Кінцева температура води t, °C	Об'єм води $V_{\text{води}}$, м³	Маса води $m_{\text{води}}$, кг	Питома теплоємність води $c_{\text{води}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$	Початкова температура тіла $t_{\text{тіла}}$, °C	Кінцева температура тіла t, °C	Маса тіла $m_{\text{тіла}}$, кг	Питома теплоємність тіла $c_{\text{тіла}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$

Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Сформулюйте висновок, у якому зазначте:

а) яку величину ви визначали;

б) який результат отримали;

в) які чинники вплинули на точність отриманого результату.

Творче завдання

Запропонуйте спосіб визначення питомої теплоємності рідини. Запишіть план експерименту.

Завдання «із зірочкою»

Оцініть відносну похибку проведеного в ході лабораторної роботи експерименту, скориставшись формулою:

$$\varepsilon = \left|1 - \frac{c_{\text{вим}}}{c_{\text{табл}}}\right| \cdot 100\,\%,$$

де $c_{\text{вим}}$ — отримане значення питомої теплоємності речовини, з якої виготовлено тіло; $c_{\text{табл}}$ — табличне значення питомої теплоємності речовини.

ЧАСТИНА 2. ЗМІНА АГРЕГАТНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

§ 10. АГРЕГАТНИЙ СТАН РЕЧОВИНИ

Чи траплялося вам бачити морозним зимовим днем швидку гірську річку? Навколо лежить сніг, завмерли дерева, укриті інеєм, що сяє в сонячних променях, а вода в річці не замерзає. Надзвичайно чиста, прозора, вона тече, розбиваючись об обмерзле каміння. У чому відмінність води і льоду? Чому з'явився на деревах іній? У цьому параграфі ви обов'язково знайдете відповіді на ці запитання.

1 Спостерігаємо різні агрегатні стани речовини

Ви вже знаєте, що лід (сніг, іній) і вода — це різні *агрегатні стани води: твердий* і *рідкий*. Поява інею на деревах пояснюється просто: у повітрі завжди є водяна пара, яка, кристалізуючись, конденсується й осідає у вигляді інею. Водяна пара — це третій агрегатний стан води — *газоподібний*.

Наведемо ще приклад. Ви, напевно, знаєте, що небезпечно розбити термометр із ртуттю — густою рідиною сріблястого кольору; ртуть, випаровуючись, утворює дуже отруйну пару. А от за температури, нижчої від –39 °С, ртуть являє собою твердий метал. Таким чином, ртуть, як і вода, може перебувати у твердому, рідкому та газоподібному станах.

Практично будь-яка речовина залежно від фізичних умов може перебувати в трьох агрегатних станах: **твердому, рідкому, газоподібному.**

Існує ще один агрегатний стан речовини — **плазма** — частково або повністю йонізований газ, тобто газ, який складається із заряджених частинок (йонів і електронів) та нейтральних атомів і молекул. Наприклад, ртуть перебуває в плазмовому стані в увімкнених ртутних лампах (так звані лампи денного світла). У Всесвіті плазма є найпоширенішим станом речовини (рис. 10.1).

Рис. 10.1. Речовина в надрах зір перебуває у стані плазми. Розрідженою плазмою заповнений і міжзоряний простір

Водяна пара, вода, лід утворені *однаковими* молекулами — молекулами води. Чому ж різняться фізичні властивості речовин, які утворені однаковими молекулами, але перебувають у різних агрегатних станах? Причина відмінностей полягає в тому, що молекули по-різному рухаються та взаємодіють.

2 Пояснюємо фізичні властивості твердих тіл

Тіла, зображені на рис. 10.2, різняться кольором, формою тощо, вони складаються з різних речовин. Разом із тим вони мають спільні фізичні властивості, притаманні всім твердим тілам.

Тверді тіла зберігають об'єм і форму. Річ у тім, що частинки (молекули, атоми, йони) твердих тіл розташовані в положеннях рівноваги. У цих положеннях сила притягання і сила відштовхування між частинками дорівнюють одна одній. У разі спроби збільшити або зменшити відстань між частинками (тобто збільшити або зменшити розмір тіла) виникає міжмолекулярне притягання або відштовхування відповідно. Крім того, частинки твердих тіл практично не пересуваються — вони лише безперервно коливаються.

У ході вивчення будови твердих тіл з'ясовано, що частинки більшості речовин у твердому стані розташовані в чітко визначеному порядку, тобто, як кажуть фізики, утворюють кристалічні ґратки. Такі речовини називають **кристалічними**. Прикладами кристалічних речовин можуть бути алмаз, графіт (рис. 10.3), лід, сіль (рис. 10.4), метали тощо.

Порядок розташування частинок у кристалічній ґратці речовини визначає фізичні властивості речовини. Так, алмаз і графіт складаються з тих самих атомів вуглецю, однак ці речовини дуже різняться, оскільки атоми в них розташовані по-різному (див. рис. 10.3).

Існує *група твердих речовин* (скло, віск, смола, бурштин тощо), *частинки яких не утворюють кристалічні ґратки* і в цілому розташовані безладно. Такі речовини називають **аморфними**.

За певних умов тверді тіла плавляться, тобто переходять у рідкий стан. *Кожна кристалічна речовина плавиться за певної температури.* На відміну від кристалічних, *аморфні речовини не мають певної температури плавлення* — вони переходять у рідкий стан, поступово розм'якшуючись. Докладніше про плавлення твердих тіл див. у § 11.

Рис. 10.2. Незважаючи на численні відмінності, всі тверді тіла зберігають об'єм і форму

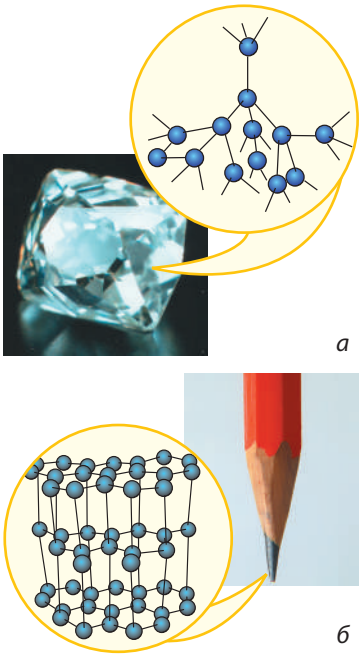
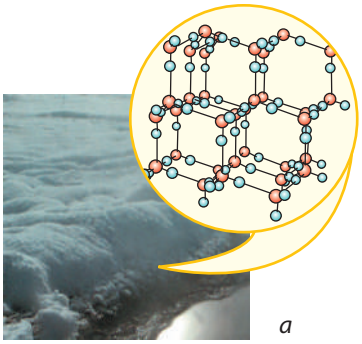
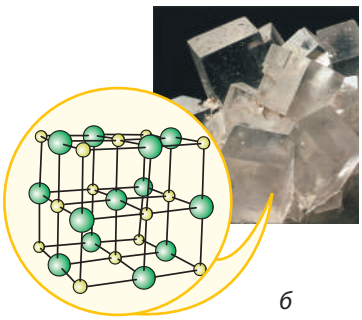


Рис. 10.3. Моделі кристалічних ґраток: *а* — алмазу, *б* — графіту. Кульками зображено атоми вуглецю. Насправді атоми розташовані впритул один до одного; ліній, що з'єднують атоми, не існує, їх проведено лише для того, щоб продемонструвати характер просторового розташування атомів



а



б

Рис. 10.4. Моделі кристалічних ґраток: *а* — льоду (H_2O — молекула води: червоні кульки — атоми кисню, сині — атоми водню); *б* — кухонної солі (жовті кульки — йони натрію, зелені — йони хлору)

Рис. 10.5. У рідкому стані речовина зберігає свій об'єм, але набуває форми посудини, в якій міститься

3 Пояснюємо фізичні властивості рідин

Рідина змінює форму, набуваючи форми тієї посудини, в якій міститься, зберігає об'єм (рис. 10.5) *і є практично нестисливою**. Ці властивості рідин пояснюються так.

Як і в твердих тілах, частинки в рідинах розташовані впритул одна до одної (рис. 10.6): середня відстань між ними приблизно дорівнює розмірам самих частинок. Таке щільне упакування частинок спричиняє не тільки збереження об'єму рідини, але й те, що рідину майже неможливо стиснути.

Згадайте про сили міжмолекулярного притягання й відштовхування та поясніть останнє твердження самостійно.

Кожна частинка рідини протягом певного часу (порядку 10^{-11} с) здійснює рух, подібний до коливального, не віддаляючись при цьому від своїх «сусідів»; потім вона вивертається зі свого оточення та, перескочивши в інше місце, потрапляє в нове оточення, де знову деякий час коливається біля свого нового положення рівноваги. Перескакування (переходи) молекул з одного рівноважного стану в інший відбуваються здебільшого в напрямку зовнішньої сили, тому *рідина є плинною* — під дією зовнішніх сил вона набуває форми тієї посудини, в якій міститься.

4 Пояснюємо фізичні властивості газів

Слово «газ» походить від грецького «хаос», «безлад». І справді, для газоподібного стану речовини характерний повний безлад у взаємному розташуванні та русі частинок.

Наприклад, частинки повітря у вашій кімнаті розташовані на відстанях, які приблизно в 10 *разів перевищують розміри самих частинок*. На таких відстанях частинки практично не взаємодіють одна з одною, тому вони розлітаються й *газ займає весь наданий об'єм*. Великими відстанями між частинками пояснюється й той факт, що *гази легко стискаються*.

* Стисливість рідин залежить від тиску і температури.

Щоб зрозуміти, як рухаються молекули та атоми газу, уявімо рух однієї частинки. Ось вона рухається в якомусь напрямку, зіштовхується з іншою частинкою, змінює напрямок і швидкість свого руху й летить далі, до наступного удару (рис. 10.7). Чим більшою є кількість частинок у певному об'ємі, тим частіше вони зіштовхуються. Наприклад, кожна частинка, що входить до складу повітряв класній кімнаті, зіштовхується з іншими та змінює швидкість свого руху кілька мільярдів разів за секунду.

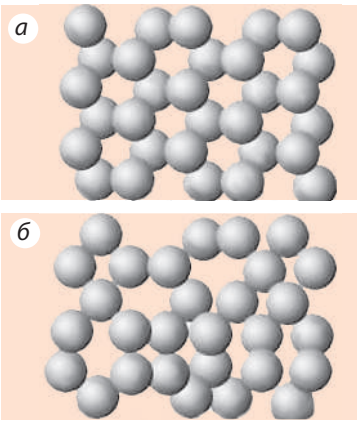


Рис. 10.6. Характер розташування частинок: *а* — у твердих кристалічних речовинах; *б* — у рідинах і аморфних речовинах (частинки в цілому розташовані хаотично, однак у невеликому об'ємі речовини зберігається деяка взаємна орієнтація сусідніх частинок — існує ближній порядок)

5 Дізнаємося про наноматеріали

«Поки що ми мусимо користуватися атомарними структурами, які пропонує нам природа... Але в принципі фізик міг би створити будь-яку речовину за заданою хімічною формулою», — заявив у 1959 р. у своїй лекції «Там, унизу, — повно місця» американський фізик *Річард Фейнман* (рис. 10.8).

Фейнман припустив, що за допомогою певного «маніпулятора» можна брати окремі атоми та молекули і, складаючи їх як цеглинки, створювати нові матеріали. Науковець заклав майбутні основи та позначив провідні напрями розвитку *нанотехнологій*. Це і надщільний запис інформації, і розробка мініатюрних комп'ютерів, і створення хірургічних інструментів, які виконують операції безпосередньо в організмі людини. Фейнман говорив: «Було б цікаво для хірургії, якби ви могли проковтнути хірурга. Ви введете механічного хірурга в кровоносні судини, він пройде до серця й «огляне» там...»

На той час ідеї Фейнмана здавалися фантастикою. Але вже в 1981 р. був створений сканувальний тунельний мікроскоп; з'явилася можливість маніпулювати речовиною на атомарному рівні та отримувати матеріали з унікальними властивостями — **наноматеріали**.

Згідно з тлумачним словником, матеріали — це предмети, речовини, що йдуть на виготовлення різноманітних виробів;

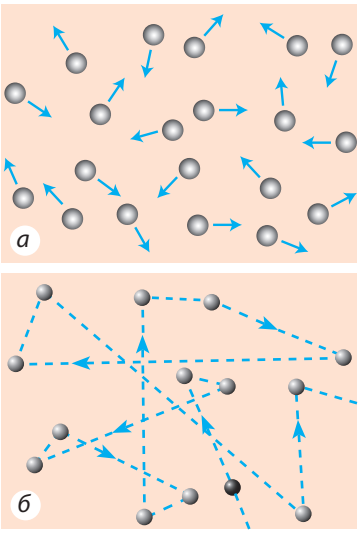


Рис. 10.7. Рух і розташування частинок газу: *а* — напрямок руху частинок змінюється в результаті зіткнення з іншими частинками; *б* — приблизна траєкторія руху частинки (збільшено в мільйон разів)

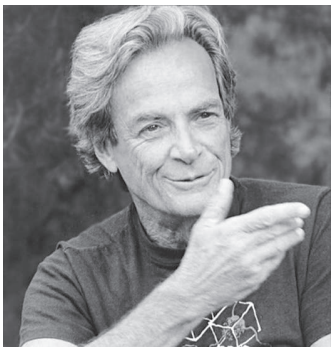


Рис. 10.8. Річард Філліпс Фейнман (1918–1988) — видатний американський фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики, один із засновників квантової електродинаміки

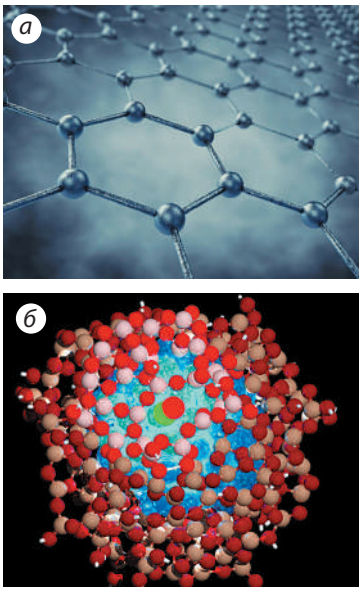


Рис. 10.9. Деякі нанооб'єкти: *а — графен* — шар атомів вуглецю завтовшки лише 0,18 нм і горизонтальними розмірами близько 10 мкм; *б — наночастинка* — частинка, розмір якої в кожному напрямку не перевищує 100 нм

сировина. Префікс *нано-* (у перекладі з грецької «гном, карлик») використовується для запису частинних одиниць СІ й означає «одна мільярдна». Відповідно об'єкти, хоча б один із лінійних розмірів яких не перебільшує 100 нанометрів (100 нм), називають *нанооб'єктами* (рис. 10.9). Отже, **наноматеріали** — *це матеріали, які штучно створені з використанням нанооб'єктів і призначені для виготовлення різноманітних виробів*.

6 Виявляємо властивості наноматеріалів і перспективи їхнього застосування

Властивості наноматеріалів дуже відрізняються від властивостей звичайних речовин (навіть якщо й ті, й інші складаються з атомів однакового виду), тому їх можна розглядати як особливий стан речовини.

На відміну від звичайних об'єктів, які складаються з величезної кількості частинок (атомів, молекул, йонів), нанооб'єкти можуть складатися лише з кількох десятків частинок. Саме тому вони мають *малі розміри*. Це дозволяє розмістити на невеликій площі велику кількість нанооб'єктів, що є дуже важливим, наприклад, для наноелектроніки та запису інформації. Нанооб'єкти можуть проникати в будь-які ділянки тіла людини або частини машини, тому їх, наприклад, можна використовувати в медицині для доправлення ліків у певні частини організму (рис. 10.10).

Крім того, *нанооб'єкти мають величезну частку атомів, розміщених на поверхні*. Завдяки цьому в декілька разів прискорюється взаємодія нанооб'єкта і середовища, в яке він поміщений. Саме тому наноматеріали є дуже добрими каталізаторами, які дозволяють у мільйони разів прискорити хімічні реакції. Так, наночастинки діоксиду титану можуть розкладати воду на водень і кисень під дією звичайного сонячного світла, нанопористі речовини ефективно поглинають домішки й токсини, а поверхня, вкрита гідрофобним нанопорошком, не «боїться» забруднення та намокання, бо відштовхує всі рідини.

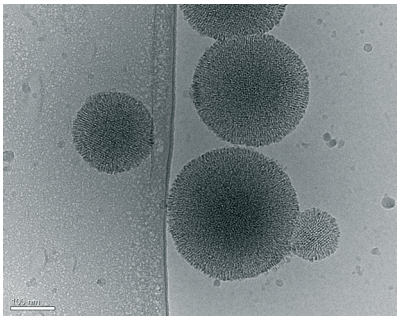


Рис. 10.10. Наночастинки мезопористого кремнезему, які містять протипухлинний препарат (зображення отримано за допомогою електронного мікроскопа)

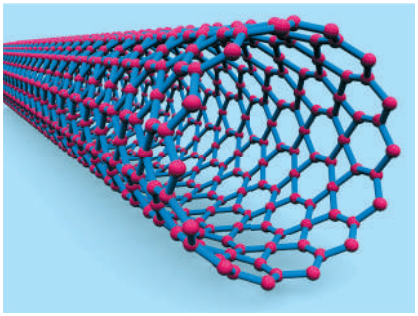


Рис. 10.11. Нанотрубка — протяжна циліндрична структура діаметром від одного до кількох десятків нанометрів і завдовжки до кількох мікрометрів

Важливою особливістю нанооб'єктів є *відсутність дефектів*, тому, наприклад, нанотрубки (рис. 10.11) у десятки разів міцніші за сталь і приблизно в чотири рази легші за неї. Якби вдалося зробити такі трубки досить довгими й виготовити з них кабель, то отриманий кабель проводив би електричний струм у сотні разів краще за мідний.

Зрозуміло, що ми окреслили лише невелику частину перспектив застосування наноматеріалів. Зараз нанонаука дуже швидко розвивається. На думку багатьох експертів, XXI ст. буде століттям нанотехнологій.

Підбиваємо підсумки

Практично будь-яка речовина залежно від фізичних умов може існувати в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному. Коли речовина переходить з одного агрегатного стану в інший, змінюються взаємне розташування частинок речовини (молекул, атомів, йонів) і характер їхнього руху та взаємодії.

Існує четвертий агрегатний стан — плазма. Плазма — це частково або повністю йонізований газ.

Останнім часом набувають широкого застосування наноматеріали. Властивості наноматеріалів суттєво відрізняються від властивостей звичайних речовин, тому їх можна розглядати як особливий стан речовини.

Контрольні запитання

1. Чи можна стверджувати, що ртуть — завжди рідина, а повітря — завжди газ? **2.** Чи відрізняються одна від одної молекули водяної пари та льоду? **3.** У якому стані перебуває речовина в надрах зір? **4.** Чому тверді тіла зберігають об'єм і форму? **5.** У чому подібність і в чому відмінність кристалічних й аморфних речовин? **6.** Як рухаються і як розташовані молекули в рідинах? **7.** Чому гази займають весь наданий об'єм? **8.** Наведіть приклади нанооб'єктів. **9.** Які властивості наноматеріалів можуть забезпечити їх широке використання?

Вправа № 10

1. Виберіть правильне закінчення речення.
Якщо перелити рідину з однієї посудини в іншу, рідина...
а) змінить і форму, і об'єм
б) збереже і форму, і об'єм
в) збереже об'єм, але змінить форму
г) збереже форму, але змінить об'єм

2. Вода випарувалась і перетворилася на пару. Чи змінилися при цьому молекули води? Як змінилися розташування молекул і характер їхнього руху?

3. Чи може газ заповнити банку наполовину?

4. Чи можна стверджувати, що в закритій посудині, яка частково заповнена водою, над поверхнею рідини води немає?

5. У чайнику кипить вода. Чи справді ми бачимо водяну пару, що виходить із носика чайника?

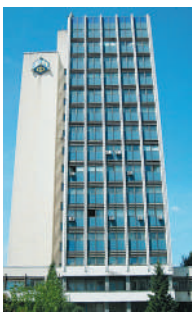
6. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про нанороботів та галузі їх майбутнього застосування. Підготуйте презентацію або коротке повідомлення.

7. З наведених назв фізичних величин оберіть ті, що є характеристикою речовини: а) густина; б) маса; в) об'єм; г) питома теплоємність; д) температура; е) швидкість руху.

Експериментальне завдання

«Тверда рідина». Аморфні тіла називають дуже в'язкими рідинами. Використовуючи воскову свічку та маркер, доведіть, що віск, нехай дуже повільно, але тече. Для цього покладіть маркер на підвіконня, зверху на маркер (перпендикулярно до нього) покладіть свічку й залиште так на кілька днів. Поясніть результати експерименту.

Фізика і техніка в Україні



Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (Київ)

Сучасне життя неможливо уявити без застосування металів. На жаль, природа не створила «ідеального» металу. Деякі (титан) мають велику міцність, невелику густину, проте досить дорого коштують, інші (алюміній) мають малий опір і водночас недостатню міцність. Тож протягом століть учені намагаються змінити властивості металів, зберігаючи та покращуючи їхні «корисні» якості.

Інститут металофізики, історія якого розпочинається з лабораторії металофізики АН УРСР, заснованої в 1945 р. академіком *Георгієм В'ячеславовичем Курдюмовим*, сьогодні є визнаним у світі науковим центром фундаментальних досліджень у галузі фізики металів.

Основними завданнями інституту є: розроблення фізичних основ і пошук принципово нових способів створення металічних матеріалів з високим рівенем фізичних та механічних властивостей, які можуть працювати у складних термосилових і радіаційних умовах; розроблення на основі цих матеріалів принципово нових пристроїв для сучасної техніки; оновлення існуючих технологічних режимів і структури виробництва металічних виробів та приладів на їх основі. Створені в інституті матеріали з унікальними властивостями використовуються в різних галузях як в Україні, так і за кордоном.

§ 11. ПЛАВЛЕННЯ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЯ

Чи замислювалися ви над тим, чому грудочка снігу в руці тане? Чому утворюються крижані бурульки і коли вони утворюються — у відлигу чи, навпаки, в мороз? Як охолодити трохи снігу без морозильної камери? Чому шматочок свинцю можна розплавити в сталевій ложці, а от шматочок сталі у свинцевій ложці — не можна? Вивчивши матеріал параграфа, ви зможете відповісти на ці запитання.

1 Знайомимося з процесами плавлення та кристалізації, дізнаємося про температуру плавлення

Якщо трохи снігу занести до теплої кімнати, через деякий час сніг розтане, або, як кажуть фізики, *розплавиться*.

Плавлення — це процес переходу речовини з твердого стану в рідкий.

Простежимо зміну температури снігу в процесі його танення в теплій кімнаті (рис. 11.1). На початку досліду температура снігу є нижчою від 0 °С, сніг не тане, а його температура швидко збільшується (рис. 11.1, *а*). Щойно стовпчик термометра досягає позначки 0 °С, температура перестає збільшуватись, а в посудині з'являється вода (сніг починає плавитися). Обережно перемішаємо воду із залишками снігу й відзначимо, що температура суміші залишається незмінною (рис. 11.1, *б*). І тільки після того як сніг повністю розплавиться, температура знову починає зростати (рис. 11.1, *в*).

Досліди показують: *практично всі кристалічні речовини починають плавитися після досягнення ними певної (власної для кожної речовини) температури; у процесі плавлення температура речовини не змінюється*.

Температура плавлення — це температура, за якої тверда кристалічна речовина плавиться, тобто переходить у рідкий стан.

Отже, тверда речовина в разі досягнення певної температури перетворюється на рідину. Так само за певних умов тверднуть (кристалізуються) рідини. Наприклад, якщо

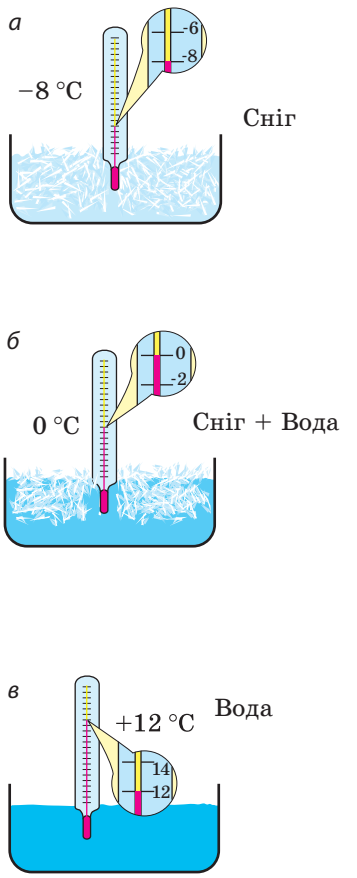


Рис. 11.1. Спостереження процесу танення снігу: *а* — за від'ємної температури вода перебуває у твердому стані; *б* — за температури 0 °С сніг починає танути, під час танення температура суміші незмінно дорівнює 0 °С; *в* — за додатної температури вода перебуває в рідкому стані

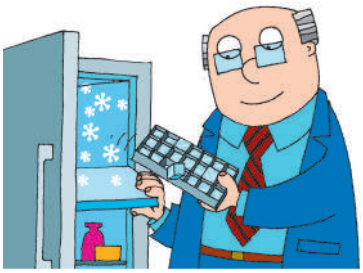


Рис. 11.2. У морозильній камері вода кристалізується, перетворюючись на лід

винести воду на мороз або поставити посудину з водою в морозильну камеру, то вода з часом закристалізується, перетворившись на лід (рис. 11.2).

Кристалізація — це процес переходу речовини з рідкого стану у твердий кристалічний.

Вимірюючи температуру речовин під час їх охолодження та подальшої кристалізації, доходимо таких висновків:

1) *процес кристалізації починається тільки після охолодження рідини до певної для цієї рідини температури*;

2) *під час кристалізації температура речовини не змінюється*;

3) *температура кристалізації речовини дорівнює температурі її плавлення*.

Температури плавлення (кристалізації) різних речовин досить сильно різняться. Так, температура плавлення спирту становить –115 °С, льоду — 0 °С; сталь плавиться за температури 1400 °С, свинець — за температури 327 °С, а щоб розплавити вольфрам, його слід нагріти до величезної температури 3387 °С.

Сподіваємося, тепер ви легко можете відповісти на запитання: чому шматок свинцю можна розплавити в сталевій ложці, а шматок сталі у свинцевій ложці — не можна?

Температура плавлення (кристалізації) — це характеристика речовини, тому її визначають експериментально й заносять у таблиці (див. табл. 2 *Додатка*). У таких таблицях немає *аморфних речовин*, адже вони, як ви вже знаєте, не мають певної температури плавлення: нагріваючись, аморфні речовини поступово м'якшають, а в ході охолодження поступово твердішають. Надалі, вивчаючи процеси плавлення та кристалізації, ми розглядатимемо тільки кристалічні речовини.

2 Будуємо графік і пояснюємо процеси плавлення та кристалізації

Для детальнішого вивчення процесів плавлення та кристалізації речовин розглянемо графік залежності температури кристалічної речовини (льоду) від часу її нагрівання та охолодження (рис. 11.3).

На момент початку спостереження (точка *A*) температура льоду становила –40 °С. Унаслідок роботи нагрівника температура льоду збільшується (ділянка *AB*). З погляду молекулярно-кінетичної теорії будови речовини в цей інтервал часу збільшується кінетична енергія коливального руху молекул води у вузлах кристалічної ґратки льоду.

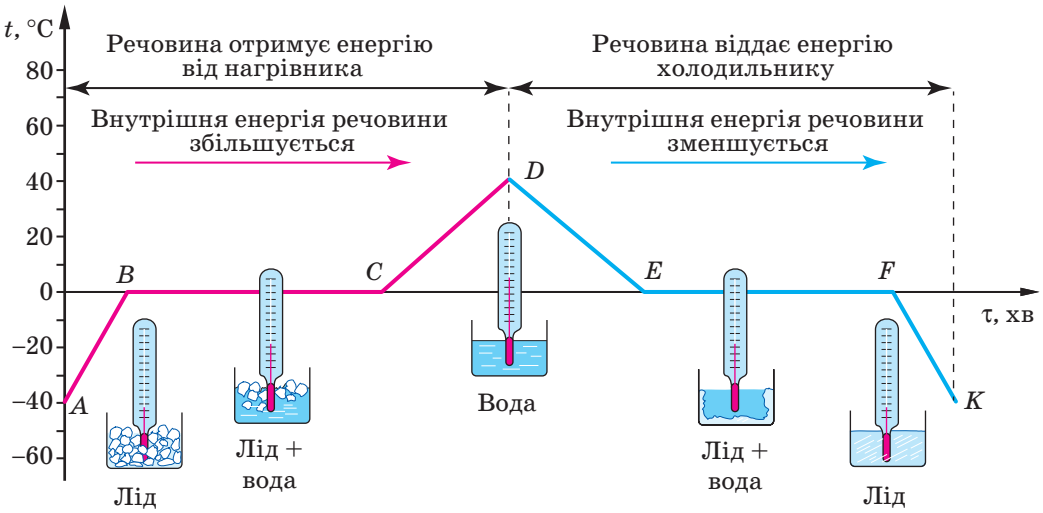


Рис. 11.3. Графік плавлення льоду та кристалізації води. Графік матиме таку симетричність, якщо кількість теплоти, яку щохвилини отримує лід, а потім вода під час роботи нагрівника, дорівнюватиме кількості теплоти, яку щохвилини віддає та сама речовина під час роботи холодильника

Після досягнення температури 0 °С лід починає плавитися, а його температура не змінюється (ділянка *BC*) незважаючи на те, що нагрівник продовжує працювати й передавати льоду певну кількість теплоти. Уся енергія, що надходить від нагрівника, іде на руйнування кристалічної ґратки льоду. У цей інтервал часу внутрішня енергія льоду продовжує збільшуватися.

Після того як весь лід розплавився й перетворився на воду (точка *C*), температура води починає зростати (ділянка *CD*), тобто починає зростати кінетична енергія руху молекул.

У той момент, коли температура сягнула 40 °С (точка *D*), нагрівник вимкнули. Воду помістили в холодильник, і її температура почала падати (ділянка *DE*). Зниження температури свідчить про те, що кінетична енергія, а отже, швидкість руху молекул зменшуються.

Коли досягнуто температури кристалізації 0 °С (точка *E*), швидкість руху молекул зменшується настільки, що молекули вже не перестрибують з місця на місце. Вони поступово займають фіксовані положення (ділянка *EF*), і на момент завершення кристалізації вже всі молекули коливаються у вузлах кристалічної ґратки. Вода переходить у стан із меншою внутрішньою енергією — повністю перетворюється на лід (точка *F*).

Під час подальшої роботи холодильника замерзла вода (лід) холоне, а кінетична енергія коливального руху молекул зменшується (ділянка *FK*).

3 Переконуємося, що процеси плавлення та кристалізації неможливі без передачі енергії

Якщо помістити сніг у холодильну камеру, температура в якій є незмінною й дорівнює 0 °С, з'ясується ось що.

Як і в досліді з таненням снігу в теплій кімнаті (див. рис. 11.1), температура снігу буде спочатку збільшуватися (правда, повільніше). Адже температура в камері вища за температуру снігу, тому тепліше повітря в ній віддає певну кількість теплоти холоднішому снігу. Збільшення температури снігу триватиме доти, доки його температура не стане 0 °С. І отут починається найцікавіше. Температура снігу сягнула температури плавлення, а сніг не тане. Чому?

Згадайте: дослід, зображений на рис. 11.1, проводився в теплій кімнаті (тобто за температури вищої, ніж 0 °С). Отже, протягом усього часу спостереження відбувався теплообмін між повітрям у кімнаті та снігом. При цьому весь час сніг *одержував* енергію, зокрема й тоді, коли його температура залишалася незмінною. І сніг при цьому танув. А от у досліді з холодильною камерою температура плавлення снігу й температура повітря в холодильній камері є однаковими, тому теплообмін не відбувається. Сніг *не одержує енергію*, отже, й *не тане*.

Якщо в холодильну камеру, температура в якій 0 °С, помістити теплу воду, то зрозуміло, що вода буде охолоджуватися (тепла вода віддаватиме енергію повітрю в камері). Однак після досягнення температури 0 °С вода не кристалізуватиметься, оскільки тепер, щоб перейти в стан із меншою внутрішньою енергією, їй потрібно віддати довкіллю певну кількість теплоти, а у випадку теплової рівноваги теплообмін не відбувається.

Підбиваємо підсумки

Тепловий процес переходу речовини з твердого стану в рідкий називають плавленням. Під час плавлення температура кристалічної речовини не змінюється.

За однакової температури внутрішня енергія речовини в рідкому стані більша за внутрішню енергію речовини у твердому стані.

Щоб речовину перевести з твердого стану в рідкий, необхідне виконання двох обов'язкових умов: по-перше, потрібно нагріти речовину до температури плавлення; по-друге, під час плавлення речовина має одержувати енергію.

Тепловий процес переходу речовини з рідкого стану у твердий кристалічний називають кристалізацією. Температура кристалізації речовини дорівнює температурі її плавлення.

Щоб речовину перевести з рідкого стану в кристалічний, так само мають бути виконані дві умови: по-перше, рідину потрібно охолодити до температури кристалізації; по-друге, під час кристалізації речовина має віддавати енергію.

Контрольні запитання

1. Який процес називають плавленням? **2.** Як змінюється температура речовини в процесі плавлення? **3.** Який процес називають кристалізацією? **4.** Порівняйте температури плавлення (кристалізації) різних речовин. **5.** Чи танутиме лід у холодильнику, температура в якому становить 0 °С? А чи кристалізуватиметься за такої температури вода? **6.** Опишіть процеси, які відбуваються під час плавлення льоду та кристалізації води.

Вправа № 11

1. Чому нитку розжарення електричної лампи виготовляють із вольфраму?

2. На рис. 1 наведено графік плавлення та кристалізації деякої речовини. Якому стану речовини відповідають точки *A*, *B*, *C* і *D* графіка?

3. На рис. 2 подано графіки плавлення деяких речовин. Яка речовина має вищу температуру плавлення? Яка речовина на початку досліду мала вищу температуру? Скориставшись табл. 2 *Додатка*, визначте, про які речовини йдеться.

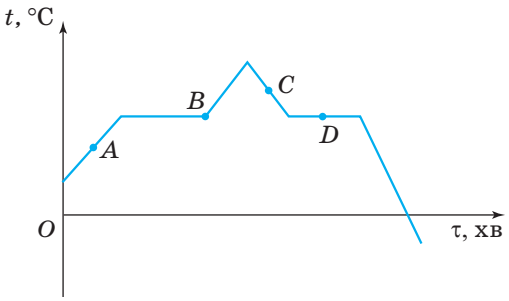


Рис. 1

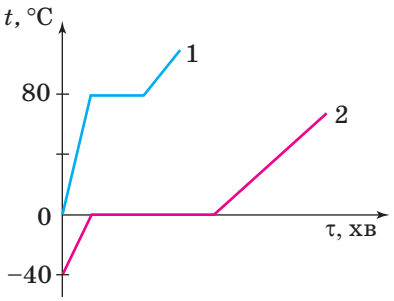


Рис. 2

4. У відрі з водою плавають шматки льоду. Чи танутиме лід, чи вода замерзатиме? Від чого це залежить?

5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, коли і чому утворюються бурульки.

6. Які з наведених фізичних величин є характеристикою тіла?
а) маса; б) жорсткість; в) об'єм; г) густина; д) кінетична енергія; е) питома теплоємність.

Експериментальне завдання

«*Морозна сіль*». Змішайте 100 г снігу, узятого за температури 0 °С, і 30 г кухонної солі (1 столова ложка з гіркою). Сніг почне швидко танути й охолоджуватися. Якщо в такий розчин опустити шматочок картоплини, то картоплина замерзне. Поясніть чому. (*Підказка*: температура кристалізації водного розчину солі менша, ніж температура замерзання води, і залежить від концентрації розчину.)

§ 12. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕННЯ

На фото зображено кристалічні речовини (сталь і лід) однакової маси, які перебувають за температури, близької до температури плавлення. Щоб розплавити ці речовини, їм слід передати певну кількість теплоти. Чи однакову кількість теплоти необхідно передати льоду і сталі, щоб перевести їх у рідкий стан? З'ясуємо.

1 Вводимо поняття питомої теплоти плавлення речовини

Ви знаєте, що під час переходу з твердого стану в рідкий речовина поглинає певну кількість теплоти і внутрішня енергія речовини збільшується, а перехід речовини з рідкого стану у твердий супроводжується виділенням теплоти та зменшенням внутрішньої енергії речовини.

Вивчення процесів плавлення та кристалізації показало, що *кількість теплоти, яку необхідно витратити на плавлення певної маси речовини, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється під час кристалізації цієї речовини* (рис. 12.1).

Виникає запитання: чи однакову кількість теплоти необхідно витратити на плавлення різних речовин однакової маси? Логічно припустити, що різну: сили взаємодії між частинками різних речовин є різними, а отже, на руйнування різних кристалічних ґраток напевне потрібна різна енергія. І це справді так. Наприклад, щоб розплавити 1 кг льоду, йому потрібно передати в 13 разів більше теплоти, ніж необхідно для плавлення 1 кг свинцю.

Фізичну величину, яка показує, скільки теплоти поглинає 1 кг твердої кристалічної речовини під час перетворення на рідину, називають *питомою теплотою плавлення*.

Питома теплота плавлення — фізична величина, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати твердій кристалічній речовині масою 1 кг, щоб за температури плавлення повністю перетворити її на рідину.

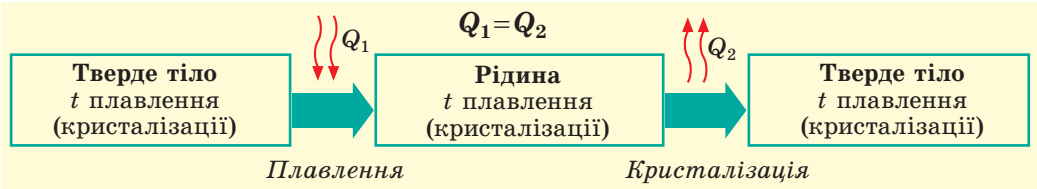


Рис. 12.1. Під час плавлення речовина поглинає ту саму кількість теплоти, яку виділяє під час кристалізації: $Q_1 = Q_2$

Питому теплоту плавлення позначають символом λ («лямбда») і обчислюють за формулою:

$$\lambda = \frac{Q}{m},$$

де Q — кількість теплоти, необхідна для плавлення речовини масою m.

Із формули для визначення питомої теплоти плавлення дістанемо її *одиницю в СІ* — **джоуль на кілограм**:

$$[\lambda] = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота плавлення показує, на скільки за температури плавлення внутрішня енергія 1 кг *речовини в рідкому стані більша, ніж внутрішня енергія* 1 кг *цієї речовини у твердому стані*. У цьому полягає фізичний зміст питомої теплоти плавлення.

Так, питома теплота плавлення льоду дорівнює 332 кілоджоулям на кілограм $\left(\lambda = 332\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$. Це означає: щоб розплавити 1 кг льоду, що перебуває за температури плавлення (0 °С), слід передати йому 332 кілоджоулі теплоти. Та сама кількість теплоти (332 кДж) виділиться й під час кристалізації 1 кг води. Тобто за температури 0 °С внутрішня енергія 1 кг води більша за внутрішню енергію 1 кг льоду на 332 кДж.

Що означає твердження: «Питома теплота плавлення сталі становить 84 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$»?

Питому теплоту плавлення речовин визначають дослідним шляхом і фіксують у таблицях (див. табл. 3 *Додатка*).

Визначити питому теплоту плавлення тугоплавких речовин (речовин, які мають високу температуру плавлення) досить складно. А от питому теплоту плавлення інших речовин, наприклад льоду, ви можете визначити навіть самостійно (рис. 12.2).

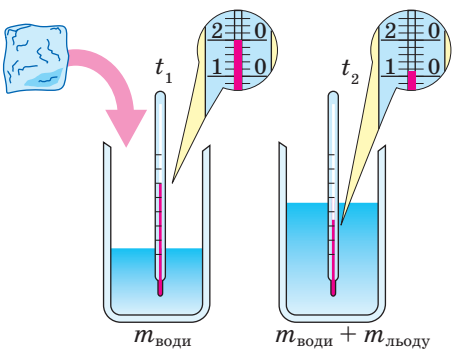


Рис. 12.2. Дослід щодо визначення питомої теплоти плавлення льоду. У калориметр, який містить відому масу води $m_{\text{води}}$ за температури t_1, занурюють лід за температури плавлення ($t_{\text{пл}} = 0\,°\text{C}$). Вода буде віддавати тепло й охолоджуватися: $Q_{\text{води}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_1 - t_2)$; лід, отримуючи тепло, буде плавитися, а отримана внаслідок плавлення вода — нагріватися: $Q_{\text{льоду}} = \lambda_{\text{льоду}} m_{\text{льоду}} + c_{\text{води}} m_{\text{льоду}} (t_2 - t_{\text{пл}})$. Вимірявши після плавлення льоду температуру t_2 води і масу m води ($m = m_{\text{води}} + m_{\text{льоду}}$) та обчисливши масу льоду ($m_{\text{льоду}} = m - m_{\text{води}}$), визначають питому теплоту плавлення льоду:

$$\lambda_{\text{льоду}} = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_1 - t_2) - c_{\text{води}} m_{\text{льоду}} (t_2 - t_{\text{пл}})}{m_{\text{льоду}}}$$

2 Обчислюємо кількість теплоти, яка необхідна для плавлення речовини або виділяється під час її кристалізації

Щоб обчислити кількість теплоти, необхідну для плавлення кристалічної речовини, узятої за температури плавлення, потрібно питому теплоту плавлення цієї речовини помножити на її масу:

$$Q = \lambda m,$$

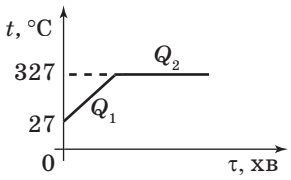
де Q — кількість теплоти, яку поглинає тверда кристалічна речовина; λ — питома теплота плавлення; m — маса речовини. (Дійсно, за означенням питомої теплоти плавлення: $\lambda = \frac{Q}{m}$, звідси $Q = \lambda m$.)

Зрозуміло, що кількість теплоти, яка виділяється під час кристалізації, розраховують за тією самою формулою.

3 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Яку кількість теплоти потрібно передати свинцю масою 5 кг, взятому за температури 27 °С, щоб його розплавити?

Аналіз фізичної проблеми. Щоб розплавити свинець, його спочатку слід нагріти до температури плавлення. Знайдемо в табл. 2 *Додатка* температуру t_2 плавлення свинцю та побудуємо схематичний графік процесу.



Загальна кількість теплоти Q дорівнюватиме сумі кількості теплоти Q_1, необхідної для нагрівання свинцю до температури плавлення, та кількості теплоти Q_2, необхідної для плавлення. Питому теплоємність c і питому теплоту плавлення λ свинцю знайдемо відповідно в табл. 1 і 3 *Додатка*.

Дано:

$m = 5$ кг

$t_1 = 27$ °С

$t_2 = 327$ °С

$c = 140 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$

$\lambda = 25 \ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} =$

$= 25\,000 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Знайти:

Q — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

$Q = Q_1 + Q_2$; (1)

$Q_1 = cm(t_2 - t_1)$ — нагрівання; (2)

$Q_2 = \lambda m$ — плавлення. (3)

Підставивши формули (2) і (3) у формулу (1), остаточно отримаємо:

$$Q = cm(t_2 - t_1) + \lambda m.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[Q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot \text{кг} \cdot \text{°С} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{Дж} + \text{Дж} = \text{Дж};$$

$$Q = 140 \cdot 5 \cdot (327 - 27) + 25\,000 \cdot 5 = 335\,000 \ \text{(Дж)}.$$

Відповідь: $Q = 335$ кДж.

Підбиваємо підсумки

Фізичну величину, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати 1 кг цієї речовини, взятої у твердому стані, щоб за температури плавлення повністю перетворити її на рідину, називають питомою теплотою плавлення λ.

Питома теплота плавлення показує, на скільки за температури плавлення внутрішня енергія 1 кг речовини в рідкому стані більша за внутрішню енергію 1 кг цієї речовини у твердому стані.

Питому теплоту плавлення обчислюють за формулою $\lambda = \frac{Q}{m}$ і в СІ вимірюють у джоулях на кілограм (Дж/кг).

Кількість теплоти, яку необхідно витратити на плавлення певної речовини, узятої за температури плавлення, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється під час кристалізації цієї речовини. Цю кількість теплоти обчислюють за формулою $Q = \lambda m$.

Контрольні запитання

1. Від чого залежить кількість теплоти, яка виділяється під час кристалізації речовини? **2.** Що називають питомою теплотою плавлення речовини? **3.** Яким є фізичний зміст питомої теплоти плавлення? **4.** Як обчислити кількість теплоти, яка необхідна для плавлення речовини або виділяється під час її кристалізації?

Вправа № 12

1. Яка кількість теплоти необхідна, щоб розплавити 500 г міді, узятої за температури плавлення?

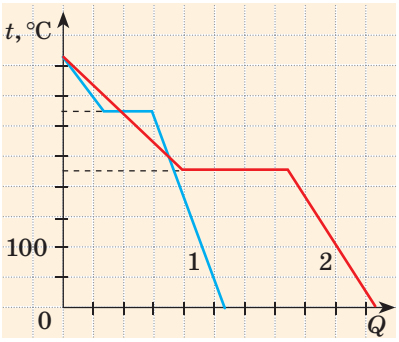
2. Яке тіло має більшу внутрішню енергію: алюмінієвий брусок масою 1 кг, узятий за температури плавлення, чи 1 кг розплавленого алюмінію за тієї самої температури? На скільки більшу?

3. Яка кількість теплоти виділиться під час кристалізації 100 кг сталі та подальшого її охолодження до 0 °С? Початкова температура сталі дорівнює 1400 °С.

4. Яка кількість теплоти потрібна для перетворення 25 г льоду, узятого за температури −15 °С, на воду за температури 10 °С?

5. У гарячу воду поклали лід, маса якого дорівнює масі води. Після того як весь лід розтанув, температура води зменшилася до 0 °С. Якою була початкова температура води, якщо початкова температура льоду дорівнювала 0 °С?

6. На рисунку зображено графіки залежності температури від кількості відданої теплоти в процесі кристалізації двох речовин однакової маси. Яка речовина має вищу температуру плавлення? більшу питому теплоту плавлення? більшу питому теплоємність у рідкому стані?



7. Свинцева куля, яка рухалася зі швидкістю 300 м/с, ударилась об металеву пластину і зупинилась. Яка частина свинцю розплавилась, якщо вважати, що свинець повністю поглинув енергію, яка виділилася під час удару? Початкова температура кулі 27 °С.

8. На дні посудини намерз лід. У посудину налили води. Чи зміниться рівень води в посудині після того, як увесь лід розтане? Якщо зміниться, то як?

Експериментальне завдання

Скориставшись рис. 12.2, запишіть план проведення експерименту з визначення питомої теплоти плавлення льоду. Які прилади для цього потрібні? Якщо є можливість, проведіть експеримент.

Підказка: якщо лід, який уже почав танути, ретельно промокнути серветкою, він майже не міститиме води, а його температура становитиме 0 °С.

§ 13. ВИПАРОВУВАННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ

Чому, виходячи з річки спекотного літнього дня, ми відчуваємо прохолоду? Куди зникають калюжі після дощу? Для чого в спеку собака висуває язика? Чому, якщо хочемо остудити руки, ми на них дмемо, а якщо хочемо зігріти, то дихаємо? Щодня можна поставити собі безліч таких запитань. Опрацювавши цей параграф, ви зможете на них відповісти.

1 Знайомимося з процесом випаровування

Будь-яка речовина може переходити з одного агрегатного стану в інший. За певних умов тверде тіло може перетворитися на рідину, рідина може затверднути чи перетворитися на газ.

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

Рідина може перетворитися на газ двома способами: *випаровуванням* і *кипінням*. Знайомство із пароутворенням почнемо з процесу випаровування.

Якщо розлити воду, то через якийсь час калюжа зникне; речі, що промокли під дощем, обов'язково із часом стануть сухими; навіть масний слід, який залишився на асфальті від несправної машини, згодом стає майже непомітним. Усі ці явища можна пояснити випаровуванням рідини.

Випаровування — це процес пароутворення з вільної поверхні рідини*.

* Процес пароутворення здійснюється і з поверхні твердих тіл (ви, напевно, помічали, що під час сильних морозів кудись зникають замерзлі калюжі). Цей процес називають *сублімацією*. Протилежний процес — перехід речовини з газоподібного стану в кристалічний — називають *кристалізацією*.

2 Пояснюємо процес випаровування та робимо висновки

Розглянемо процес випаровування з точки зору молекулярно-кінетичної теорії. Молекули рідини безперервно рухаються, постійно змінюючи як значення, так і напрямок швидкості свого руху. Серед молекул поверхневого шару рідини завжди є такі, що «намагаються» вилетіти з рідини. Ті молекули, що в певну мить рухаються повільно, не зможуть подолати притягання сусідніх молекул і залишаться в рідині. Якщо ж поблизу поверхні опиниться «швидка» молекула, то її кінетичної енергії буде достатньо, щоб виконати роботу проти сил міжмолекулярного притягання, і вона вилетить за межі рідини (рис. 13.1).

Після ознайомлення з механізмом випаровування можна зробити кілька висновків.

По-перше, той факт, що в рідині завжди є молекули, які рухаються досить швидко, дозволяє зробити висновок, що *випаровування рідин відбувається за будь-якої температури*.

По-друге, оскільки під час випаровування рідину залишають найшвидші молекули, то середня кінетична енергія решти молекул зменшується. Тому, *якщо рідина не отримує енергії ззовні, вона охолоджується*.

Крім того, під час випаровування виконується робота проти сил міжмолекулярного притягання та проти сил зовнішнього тиску, тому *процес випаровування супроводжується поглинанням енергії* (рис. 13.2).

3 З'ясовуємо, від чого залежить швидкість випаровування

Чим вища температура рідини, тим швидше рідина випаровується. Адже зі збільшенням температури рідини збільшується кількість «швидких» молекул, тому дедалі більша їх кількість має змогу подолати сили міжмолекулярного притягання й вилетіти за межі рідини.

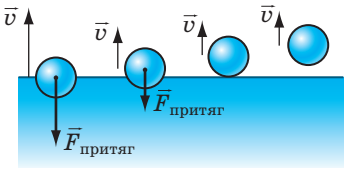


Рис. 13.1. Молекула, яка вилітає з рідини, має подолати сили міжмолекулярного притягання, що тягнуть її назад у рідину

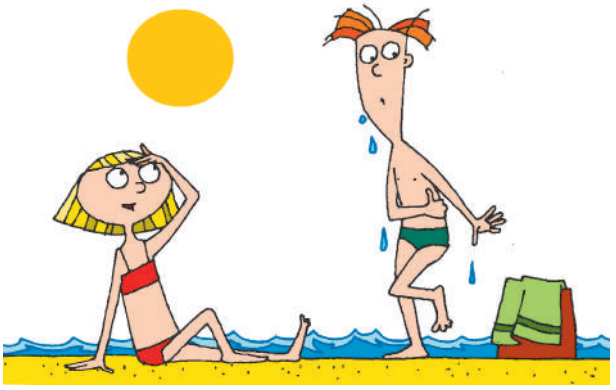


Рис. 13.2. Після купання на тілі людини є крапельки рідини. Випаровуючись, рідина поглинає енергію, і людина відчуває прохолоду навіть спекотного дня

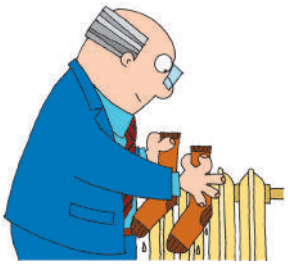


Рис. 13.3. До запитання в § 13

Рис. 13.4. Зі збільшенням площі вільної поверхні рідини (чай перелито із чашки в блюдце) швидкість випаровування збільшується. А оскільки під час випаровування чай утрачає енергію, він швидше холоне (Б. М. Кустодієв «Купчиха за чаєм»)

Рис. 13.5. Демонстрація залежності швидкості випаровування від роду рідини. Через хвилину фігурка, яку намальовано спиртом, повністю зникне; фігурка, намальована водою, залишиться частково; випаровування олії зовсім не буде помітним

Щоб висушити речі, ми інколи кладемо їх на гарячу батарею (рис. 13.3) або прасуємо. Чому в таких випадках речі висихають порівняно швидко?

Звернемо увагу ще на один момент. Намагаючись швидко висушити одяг, ми не покладемо його на батарею жмутом, а розправимо, бо зім'ятий одяг висихає набагато повільніше. Чому? Тому що *швидкість випаровування залежить від площі вільної поверхні рідини*: чим більша площа вільної поверхні рідини, тим вища ймовірність, що «швидка» молекула опиниться на поверхні, і тим швидше рідина випаровується (рис. 13.4).

Намалюємо на склі або класній дошці три фігурки. Одну зобразимо серветкою, змоченою в спирті, другу — серветкою, змоченою у воді, третю — серветкою, змоченою в олії (рис. 13.5). «Спиртова» фігурка миттю випарується, «водяна» протримається трохи довше, натомість «олійна» радуватиме нас кілька днів. Річ у тім, що сили притягання між молекулами різних рідин є різними, тому *швидкість випаровування залежить від роду рідини*. Очевидно, що повільніше випаровуються ті рідини, молекули яких сильніше взаємодіють одна з одною.

Життєвий досвід показує, що *швидкість випаровування залежить* також *від руху повітря*. Насправді, щоб швидко висушити волосся, ми вмикаємо фен на потужніший режим (рис. 13.6); щоб остудити обпечену руку, дмемо на неї. Білизна, вивішена на вітрі, сохне швидше, ніж у затишку. Таку залежність теж легко пояснити з погляду молекулярного руху. Біля поверхні рідини завжди існує «хмара» молекул, які повилітали з неї (рис. 13.7). Ці молекули хаотично рухаються, зіштовхуються одна з одною та з молекулами інших газів, які складають повітря. У результаті такого руху молекула рідини може так близько підлетіти до її поверхні, що молекулу «захоплять» сили міжмолекулярної взаємодії та знову повернуть у рідину. А якщо є вітер,

то він відносить молекули, що вилетіли з рідини, і не дає їм змоги повернутися.

Якби молекули, залишаючи рідину, зовсім не поверталися до неї, то швидкість випаровування була б величезною. Наприклад, за кімнатної температури повна склянка води випарувалася б за 4 хвилини, адже за цих умов з 1 $см^2$ води щосекунди вилітає 10^{21} молекул.

Рис. 13.6. Швидкість випаровування залежить від руху повітря

4 Знайомимося з процесом конденсації

Ви вже знаєте, що молекули весь час вилітають із рідини і що певна їх кількість повертається в цю рідину. Таким чином, поряд із процесом випаровування, в ході якого рідина перетворюється на пару, існує зворотний процес, коли речовина з газоподібного стану переходить у рідкий.

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

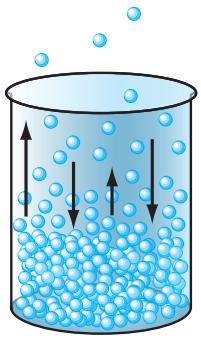


Рис. 13.7. Багато молекул, які залишили рідину, повертаються в неї внаслідок теплового руху

Процеси конденсації (від латин. *condensatio* — згущення, ущільнення) води в природі ми спостерігаємо щодня. Так, літнього ранку на листі рослин ми бачимо прозорі краплинки *роси* (рис. 13.8, *а*). Це водяна пара, яка вдень накопичується в повітрі внаслідок випаровування, а вночі, охолоджуючись, конденсується.

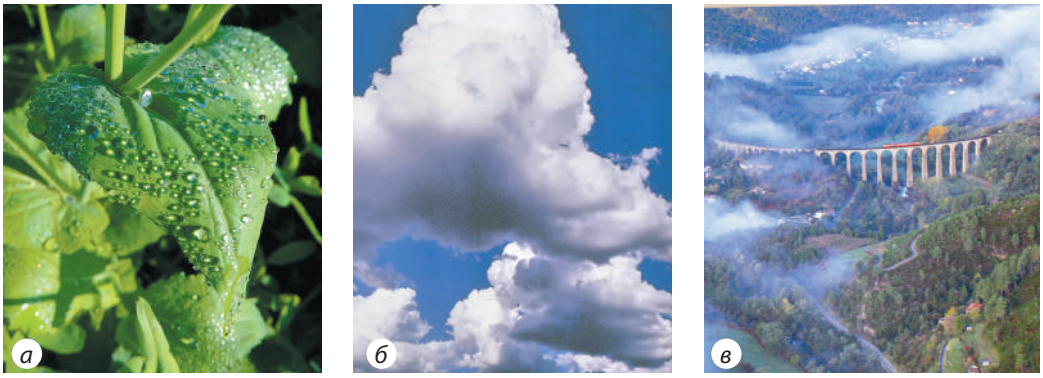


Рис. 13.8. Прояви конденсації в природі: випадання роси *(а)*; утворення хмар *(б)*; поява туману *(в)*

Якщо вологе повітря піднімається у вищі шари атмосфери, то після його охолодження утворюються *хмари* (рис. 13.8, *б*). Якщо вологе повітря охолоджується поблизу поверхні Землі, то утворюється *туман* (рис. 13.8, *в*). І хмари, і туман складаються з дрібних краплинок води, що утворюються внаслідок конденсації водяної пари*. Оскільки *процес конденсації супроводжується виділенням енергії*, утворення туману затримує зниження температури повітря.

Підбиваємо підсумки

Тепловий процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають пароутворенням. Процес пароутворення з вільної поверхні рідини називають випаровуванням.

Випаровування відбувається за будь-якої температури, і воно є тим інтенсивнішим, чим вища температура рідини. Швидкість випаровування збільшується також зі збільшенням площі вільної поверхні рідини та внаслідок руху повітря поблизу цієї поверхні. Крім того, інтенсивність випаровування залежить від роду рідини.

Тепловий процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називають конденсацією.

Випаровування відбувається з поглинанням енергії. Конденсація, навпаки, супроводжується виділенням енергії.

Контрольні запитання

1. Що таке пароутворення? **2.** Які способи пароутворення ви знаєте? **3.** Що таке випаровування? **4.** Від яких чинників і чому залежить швидкість випаровування? Наведіть приклади. **5.** Що таке конденсація? Наведіть приклади конденсації в природі.

Вправа № 13

1. Коли калюжі після дощу висихають швидше — в теплу чи прохолодну погоду? Чому?

2. Чому після змочування руки спиртом відчуття холоду є сильнішим, ніж після змочування водою?

3. Залишаючись тривалий час у мокрому одязі чи взутті, можна застудитися. Чому?

4. Для чого собака висуває язика в спеку?

5. Перебуваючи на вулиці в морозяний день, ви можете спостерігати «пару», яка йде з рота. Що ви бачите насправді?

6. Навесні, коли інтенсивно тане сніг, над полями іноді утворюється туман. У міру його розсіювання стає помітним, що кількість снігу значно зменшилася. У народі кажуть: «Весняний туман сніг з'їдає». Поясніть це твердження з точки зору фізики.

* Хмари також можуть складатися (частково чи повністю) з кристаликів льоду.

7. Понад 4500 років тому єгиптяни використовували глечики, у яких вода залишалася прохолодною навіть спекотного дня. У Середньовіччі охолоджувальні глечики (алькараца) були поширені в народів Півдня. Наприкінці XX ст. схожий винахід наново зробив мешканець Нігерії Мохаммед Бах Абба. Його «холодильник» сьогодні називають «pot in pot» («глечик у глечику»), він працює без електрики і дозволяє тривалий час зберігати продукти (див. рисунок). Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про охолоджувальні посудини більше. Підготуйте повідомлення.

Експериментальне завдання

Візьміть добре зволожену та віджату бавовняну серветку, покладіть її на блюдце, а блюдце поставте в холодильну камеру. Переконайтеся, що через деякий час серветка затвердне, а через кілька днів висохне. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та підготуйте звіт про випаровування твердих тіл.

Фізика і техніка в Україні

Михайло Петрович Авенаріус (1835–1895) протягом 1865–1891 рр. працював у Київському університеті. Учений був організатором і керівником київської школи фізиків-експериментаторів — першої фізичної школи в Україні.

Основні наукові праці М. П. Авенаріуса стосуються термоелектрики та молекулярної фізики. Учений запропонував і обґрунтував одну з основних формул, яка описує явище термоелектрики (*закон Авенаріуса*). У галузі молекулярної фізики М. П. Авенаріус вивчав рідкий і газоподібний стани речовин в умовах змінення температури і тиску. Протягом 1873–1877 рр. М. П. Авенаріус разом зі своїми учнями виміряв критичні температури багатьох речовин, які ввійшли до фізичних довідників того часу. Учений першим указав на те, що в критичній точці питома теплота випаровування дорівнює нулю; запропонував оригінальну систему розподілу змінних струмів; був ініціатором вивчення сонячної радіації та атмосферної електрики.

Удосконалена Авенаріусом система освітлення демонструвалася на Паризькій електротехнічній виставці у 1881 р., де отримала срібну медаль. За це Михайло Петрович був відзначений найвищою нагородою Французької Республіки — орденом Почесного Легіону.

§ 14. КИПІННЯ. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРОУТВОРЕННЯ

До якої температури можна нагріти воду? Чи є сенс збільшувати потужність пальника, щоб прискорити готування борщу? Як закип'ятити воду за допомогою снігу? На всі ці запитання ви зможете відповісти самі після вивчення цього параграфа.

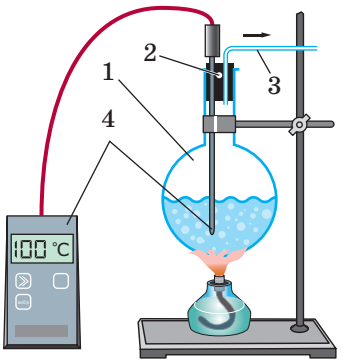


Рис. 14.1. Пристрій для спостереження та вивчення процесу кипіння рідини: 1 — скляна колба; 2 — гумовий корок з отворами; 3 — трубка для відведення водяної пари; 4 — термометр

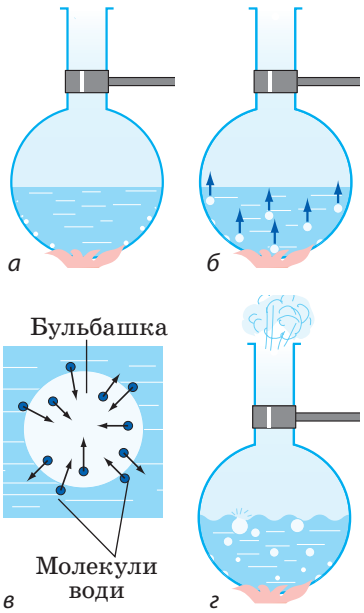


Рис. 14.2. Спостереження процесу закипання води

1 Знайомимося з процесом кипіння

Проведемо експеримент. Закріпимо колбу з водою в лапці штатива і щільно закоркуємо, лишивши в корку два отвори. В один отвір вставимо трубку для виходу пари, у другий помістимо термометр (рис. 14.1). Почнемо нагрівати воду в колбі.

Через якийсь час дно та стінки колби вкриються *бульбашками* (рис. 14.2, *а*), які утворені розчиненими у воді газами та водяною парою*. Річ у тім, що зі збільшенням температури розчинність газів зменшується і «зайвий» газ виділяється всередину бульбашок, також усередину бульбашок випаровується вода. Зі зростанням температури тиск газу всередині бульбашок теж зростає, і щойно він перевищить зовнішній тиск, бульбашки почнуть збільшуватися.

Після досягнення бульбашкою певного об'єму *архімедова сила* відриває її від дна посудини й бульбашка піднімається (рис. 14.2, *б*). На місцях бульбашок, що відірвалися, залишається невелика кількість газу — *зародки нових бульбашок*.

Верхні шари рідини певний час холодніші за нижні, тому у верхніх шарах водяна пара в бульбашках конденсується і бульбашки різко зменшуються в об'ємі — схлопуються. Цей процес супроводжується шумом і утворенням численних дрібних бульбашок. Вода стає каламутною — говорять, що вона «кипить білим ключем».

Коли рідина прогріється (температури верхніх і нижніх шарів зрівняються), бульбашки, піднімаючись, уже не зменшуватимуться в об'ємі, а навпаки, збільшуватимуться,

* Насправді мікробульбашки газу в рідині є завжди, проте помітними вони стають тільки за досить високої температури.

адже весь час усередину бульбашок активно випаровується вода (рис. 14.2, *в*). Досягнувши поверхні рідини, бульбашки лопаються і викидають назовні значну кількість водяної пари (рис. 14.2, *г*). Вода при цьому вирує і клекоче — ми кажемо, що вона закипіла. Термометр у цей момент показує температуру 100 °С.

Кипіння — це процес пароутворення, який відбувається в усьому об'ємі рідини та супроводжується утворенням і зростанням бульбашок пари.

2 З'ясовуємо, від чого залежить температура кипіння

Продовжимо експеримент (див. пункт 1 параграфа). Будемо нагрівати далі воду, що вже кипить, і спостерігати за показами термометра. Побачимо, що стовпчик термометра застиг на позначці 100 °С. Отже, *під час кипіння температура рідини не змінюється.*

Температуру, за якої рідина кипить, називають **температурою кипіння.**

Чому під час готування їжі (рис. 14.3), після того як рідина закипить, доцільно зменшити потужність нагрівника?

З'ясуємо, від чого залежить температура кипіння рідини. Спочатку припинимо вихід пари з колби, міцно затиснувши трубку, яка відводить пару (рис. 14.4). Пара збиратиметься над поверхнею води, тиск над рідиною збільшиться, кипіння на якийсь час припиниться, а температура рідини почне підвищуватися. Отже, температура кипіння залежить від зовнішнього тиску. *Зі збільшенням зовнішнього тиску температура кипіння рідини зростає* (рис. 14.5).

Якщо в колбу налити теплу воду і за допомогою насоса почати відкачувати з колби повітря, через деякий час на внутрішній поверхні колби побачимо бульбашки газу. Якщо відкачувати повітря й далі, вода закипить (рис. 14.6), але вже за температури, нижчої

Рис. 14.3. До запитання в § 14

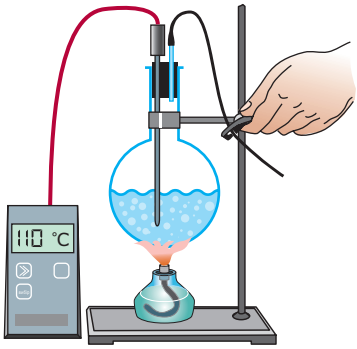


Рис. 14.4. У разі затиснення трубки для відведення пари тиск усередині колби збільшується, і це приводить до підвищення температури кипіння рідини

Рис. 14.5. Каструля-скороварка: завдяки клапанам і герметичній кришці підтримується високий тиск у просторі над рідиною, тому температура кипіння води в такій каструлі становить близько 120 °С

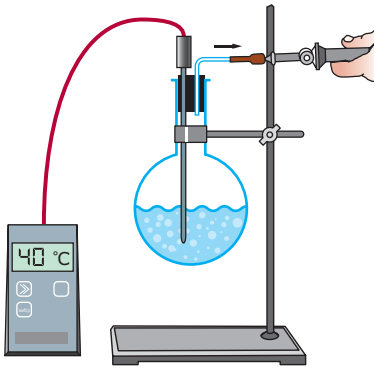


Рис. 14.6. Спостереження зниження температури кипіння води за умови зменшення зовнішнього тиску

від 100 °C. *Зі зменшенням зовнішнього тиску температура кипіння рідини знижується.*

Спостерігаючи кипіння інших рідин, наприклад спирту, олії, ефіру, можна помітити, що за однакового тиску вони киплять за різних температур, які відрізняються від температури кипіння води. Тобто *температура кипіння залежить від роду рідини.* Про температуру кипіння деяких рідин за нормального атмосферного тиску ви можете дізнатися з табл. 4 *Додатка*.

Температура кипіння також *залежить від наявності в рідині розчиненого газу.* Якщо довго кип'ятити воду, в такий спосіб видаливши з неї розчинений газ, то повторно за нормального тиску цю воду можна буде нагріти до температури, яка перевищує 100 °C. Таку воду називають *перегрітою**.

3 Вводимо поняття питомої теплоти пароутворення

Процес кипіння — це процес переходу рідини в пару, і цей процес іде з поглинанням енергії. Тому *для підтримування кипіння до рідини потрібно підводити певну кількість теплоти.* Ця енергія йде на розривання міжмолекулярних зв'язків і утворення пари.

Досліди показують: *кількість теплоти, необхідна для перетворення рідини на пару, залежить від роду рідини.*

Питома теплота пароутворення — це фізична величина, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати рідині масою 1 кг, щоб за незмінної температури перетворити її на пару.

Питому теплоту пароутворення позначають символом r** і обчислюють за формулою:

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

де Q — кількість теплоти, отримана рідиною; m — маса одержаної пари.

Із формули для визначення питомої теплоти пароутворення дістанемо *одиницю цієї величини в СІ* — **джоуль на кілограм**:

$$[r] = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питому теплоту пароутворення визначають дослідним шляхом (рис. 14.7) і заносять до таблиць (див. табл. 5 *Додатка*).

---

* Аналогічно за відсутності центрів кристалізації можна отримати *переохолоджену воду*, температура якої менша від 0 °C.

** Для позначення питомої теплоти пароутворення використовують також символ L.

4 Обчислюємо кількість теплоти, яка необхідна для пароутворення або виділяється в ході конденсації

Щоб обчислити кількість теплоти, необхідну для перетворення рідини на пару за незмінної температури, слід питому теплоту пароутворення цієї рідини помножити на її масу:

$$Q = rm,$$

де Q — кількість теплоти, яку поглинає рідина; r — питома теплота пароутворення; m — маса рідини (маса утвореної пари). (Дійсно, за означенням питомої теплоти пароутворення: $r = \frac{Q}{m}$, звідки $Q = rm$.)

Якщо перед трубкою для відведення пари помістити якийсь холодний предмет, то пара конденсуватиметься на ньому (рис. 14.8). Ретельні вимірювання показують, що *в ході конденсації пари виділяється та сама кількість теплоти, що йде на утворення цієї пари*.

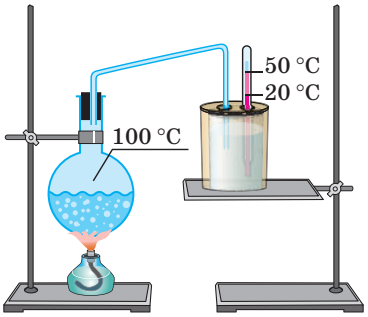


Рис. 14.7. Дослід із визначення питомої теплоти пароутворення води (див. задачу 2 у пункті 5 § 14)

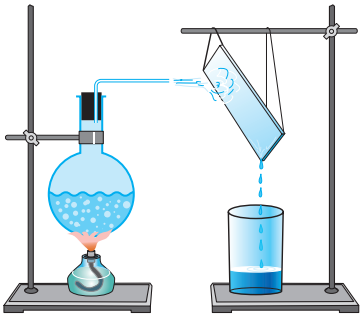


Рис. 14.8. Дослід, що демонструє конденсацію пари

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. Яка кількість теплоти необхідна, щоб довести до кипіння й повністю випарувати 3 кг води, взятої за температури 0 °С?

Аналіз фізичної проблеми. Побудуємо схематичний графік залежності температури води від часу нагрівання (рис. 14.9).

У перший момент температура води (t_0) була 0 °С — точка O на графіку. У ході нагрівання температура води збільшуватиметься прямо пропорційно кількості отриманої теплоти Q_1, а отже, і часу нагрівання (ділянка OA). Нагрівшись до 100 °С (температура кипіння води), вода починає кипіти, і її температура не буде змінюватися доти, доки вся вода не випарується (ділянка AB графіка). Вода при цьому одержує певну кількість теплоти Q_2. Питому теплоємність c води і питому теплоту пароутворення r знайдемо відповідно в табл. 1, 5 *Додатка*.

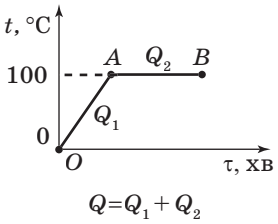


Рис. 14.9. До задачі в § 14

Дано:
$m = 3$ кг
$t_0 = 0\,^\circ\text{C}$
$t = 100\,^\circ\text{C}$
$c = 4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$
$r = 2{,}3\ \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 2{,}3\cdot 10^6\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Знайти:
Q — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

$Q_1 = cm(t - t_0)$ — кількість теплоти, необхідна для нагрівання води; (1)

$Q_2 = rm$ — кількість теплоти, необхідна для перетворення води на пару; (2)

$Q = Q_1 + Q_2$ — загальна кількість теплоти. (3)

Підставивши формули (1) і (2) у формулу (3), отримаємо:

$$Q = cm(t - t_0) + rm.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[Q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}\cdot \text{кг}\cdot{}^\circ\text{C} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\cdot \text{кг} = \text{Дж} + \text{Дж} = \text{Дж};$$

$$Q = 4200\cdot 3\cdot(100 - 0) + 2{,}3\cdot 10^6\cdot 3 = 8\,160\,000\ (\text{Дж}).$$

Відповідь: $Q = 8{,}16$ МДж.

Задача 2. Під час досліду з визначення питомої теплоти пароутворення води водяна пара, що має температуру 100 °С, надходить до калориметра, в якому міститься 500 г води за температури 20 °С (див. рис. 14.7). Після закінчення досліду температура води в калориметрі становила 50 °С, а її маса збільшилася на 25 г. За даними досліду обчисліть питому теплоту пароутворення води. Вважайте, що теплообмін із довкіллям відсутній.

Дано:
$t_1 = 100\,^\circ\text{C}$
$m_{\text{води}} = 500\ \text{г} = 0{,}5\ \text{кг}$
$t_2 = 20\,^\circ\text{C}$
$t = 50\,^\circ\text{C}$
$m_{\text{пари}} = 25\ \text{г} = 0{,}025\ \text{кг}$
$c_{\text{води}} = 4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$

Знайти:
r — ?

Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі, розв'язання. Під час досліду відбувається теплообмін між водою в калориметрі та парою.

Віддає енергію	*Отримує енергію*
водяна пара • спочатку конденсується: $Q_1 = rm_{\text{пари}}$; • отримана вода охолоджується від 100 до 50 °С: $Q_2 = c_{\text{води}} m_{\text{пари}}(t_1 - t)$.	вода в калориметрі • нагрівається від 20 до 50 °С: $Q_3 = c_{\text{води}} m_{\text{води}}(t - t_2)$.

За умовою задачі теплообмін з довкіллям відсутній, тому:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3,$$

або $rm_{\text{пари}} + c_{\text{води}} m_{\text{пари}}(t_1 - t) = c_{\text{води}} m_{\text{води}}(t - t_2)$.

Звідси знайдемо питому теплоту пароутворення води:

$$rm_{\text{пари}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_2) - c_{\text{води}} m_{\text{пари}} (t_1 - t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_2) - c_{\text{води}} m_{\text{пари}} (t_1 - t)}{m_{\text{пари}}}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[r] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot ({}^\circ\text{C} - {}^\circ\text{C})}{\text{кг}} = \frac{\frac{\text{Дж} \cdot {}^\circ\text{C}}{{}^\circ\text{C}}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$r = \frac{4200 \cdot 0{,}5 \cdot 30 - 4200 \cdot 0{,}025 \cdot 50}{0{,}025} = 2\,310\,000 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Аналіз результату. Отриманий результат ($r = 2{,}31$ МДж/кг) майже збігається з табличним значенням, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $r = 2{,}31 \ \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

Підбиваємо підсумки

Процес пароутворення, який відбувається в усьому об'ємі рідини та супроводжується утворенням і зростанням бульбашок пари, називають кипінням.

Температура кипіння рідини залежить від зовнішнього тиску, роду рідини та наявності розчинених у рідині газів.

Питома теплота пароутворення — це фізична величина, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати рідині масою 1 кг, щоб за незмінної температури перетворити її на пару.

Питому теплоту пароутворення обчислюють за формулою $r = \frac{Q}{m}$ і вимірюють у джоулях на кілограм: $[r] = 1 \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Кількість теплоти, яка необхідна для перетворення рідини на пару, дорівнює кількості теплоти, яку виділяє ця пара, конденсуючись. Цю кількість теплоти обчислюють за формулою $Q = rm$.

Контрольні запитання

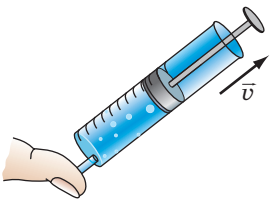
1. Що таке кипіння? **2.** Які явища спостерігаються в рідині перед тим, як вона починає кипіти? **3.** Яка сила змушує бульбашку газу підніматися на поверхню рідини? **4.** Чи змінюється температура рідини під час кипіння? **5.** Від яких чинників залежить температура кипіння рідини? **6.** На що витрачається енергія, яку одержує рідина під час кипіння? **7.** Що називають питомою теплотою пароутворення? **8.** За якою формулою можна обчислити кількість теплоти, яка поглинається під час пароутворення або виділяється під час конденсації?

Вправа № 14

1. Відомо, що температура кипіння води на вершині гори Еверест становить близько 70 °С. Як ви думаєте, чому?
2. Питома теплота пароутворення води становить 2,3 МДж/кг. Що це означає?
3. Яку кількість теплоти необхідно передати воді масою 10 кг, узятій за температури кипіння, щоб перетворити її на пару?
4. Чому опік парою є небезпечнішим, ніж опік окропом?
5. На скільки збільшиться внутрішня енергія 10 кг льоду, узятого за температури 0 °С, у результаті перетворення його на пару, що має температуру 100 °С?
6. У каструлі з водою, що кипить, розміщено відкриту колбу з водою. Чи кипить вода в колбі?
7. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про практичне застосування кипіння.

Експериментальні завдання

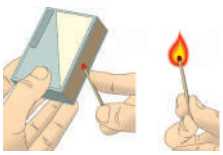
1. У прозору скляну пляшку обережно налийте невелику кількість гарячої води. Погойдайте воду в пляшці, збільшуючи таким чином площу вільної поверхні води, а отже, швидкість випаровування. Новоутворена пара витисне з пляшки частину повітря. Щільно закоркуйте пляшку, переверніть і остудіть її дно за допомогою холодної води або снігу. Вода в пляшці закипить. Поясніть це явище.
2. Візьміть одноразовий шприц без голки, приблизно наполовину заповніть його теплою водою. Щільно затуліть отвір пальцем. Повільно витягайте поршень та спостерігайте за кипінням води (див. рисунок). Поясніть спостережуване явище.



Відеодослід. Перегляньте відеоролик і поясніть спостережуване явище.

§ 15. ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА. КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ НАГРІВНИКА

Візьміть коробку із сірниками, витягніть один сірник. Перед вами — два холодних твердих тіла. Але якщо потерти головку сірника об коробку, сірник спалахне. Звідки береться ця енергія? Завдяки виконаній роботі? Але ж якщо навіть довго і з зусиллями терти сірник другим кінцем, стільки тепла не виділиться. Відповіді на зазначені питання ви знайдете в цьому параграфі.



1 Знайомимося з різними видами палива

Ми часто маємо потребу збільшити температуру якогось тіла. Так, щоб у кімнаті було тепліше, слід збільшити температуру води в батареях опалення, щоб приготувати їжу — температуру повітря в духовці. Для збільшення температури люди здавна використовували енергію, що виділяється під час хімічної реакції *горіння палива** (див. наприклад, рис. 15.1).

Паливом можуть слугувати як природні речовини (кам'яне вугілля, нафта, торф, дрова, природний газ) (рис. 15.2), так і спеціально одержані людиною (гас, бензин, порох, деревне вугілля, етиловий спирт тощо) (рис. 15.3). Як бачимо, паливо буває *твердим* (кам'яне вугілля, торф, дрова, сухе пальне), *рідким* (нафта, гас, бензин, дизельне паливо) і *газоподібним* (природний газ, пропан, бутан).

Для сучасної цивілізації паливо — необхідна умова існування (рис. 15.4). Під час роботи транспорту, різних механізмів у промисловості й сільському господарстві, обігрівання житла та готування їжі хімічна енергія, «запасена» в паливі, перетворюється на інші види енергії.

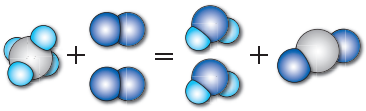


Рис. 15.1. Реакція взаємодії метану (основного складника природного газу) та кисню супроводжується виділенням теплоти:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2 + Q$$

2 Вводимо поняття питомої теплоти згоряння палива

Види палива різняться теплотворною здатністю. Переконаємось у цьому за допомогою простого досліду.

Поставимо на ліву шальку терезів спиртівку, наповнену спиртом. Над спиртівкою підвісимо металеву банку з водою, перед тим вимірявши температуру води. Після того як зрівноважимо терези, покладемо на ліву шальку важок масою 1 г. Рівновага терезів порушиться (рис. 15.5, *а*). Запалимо спиртівку. У міру згоряння спирту маса спиртівки зі спиртом зменшуватиметься, і через якийсь час рівновага терезів відновиться (це буде

Рис. 15.2. Дрова — поширене тверде природне паливо

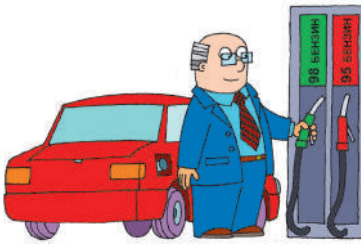


Рис. 15.3. Гас, бензин, дизельне паливо — рідке паливо, одержане людиною

* Зазначимо, що під час використання *ядерного палива* енергія виділяється в ході ядерних реакцій (докладніше про це йтиметься в старших класах).

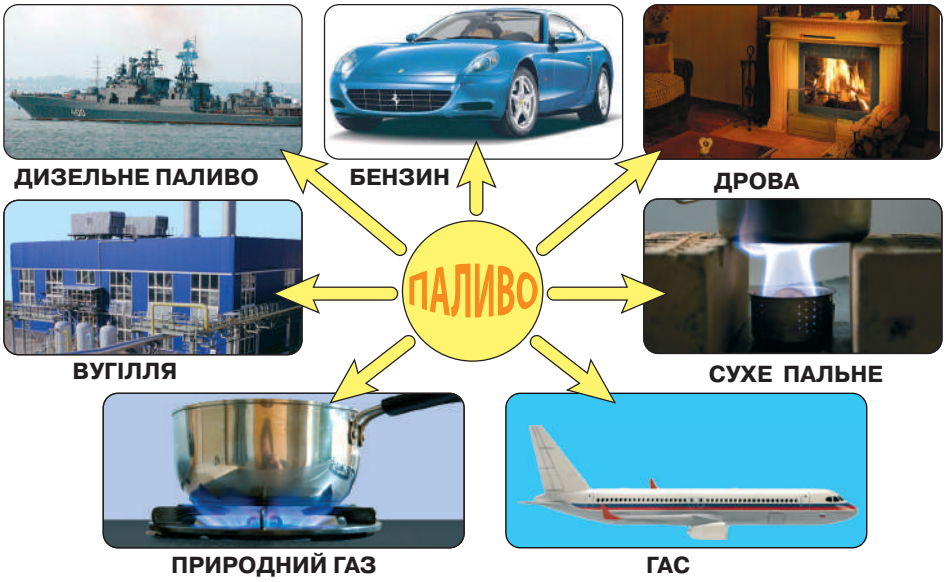


Рис. 15.4. Для сучасної цивілізації паливо є необхідною умовою існування

означати, що згорів 1 г спирту) (рис. 15.5, *б*). У цей момент погасимо спиртівку і знову виміряємо температуру води.

Повторимо дослід, узявши спиртівку, наповнену гасом, і переконаємося, що в цьому випадку вода нагріється більше. Це означає, що під час згоряння 1 г гасу виділилося більше енергії, ніж під час згоряння 1 г спирту.

Для кількісної характеристики теплотворної здатності палива застосовують фізичну величину, яку називають *питома теплота згоряння палива*.

Питома теплота згоряння палива — це фізична величина, яка характеризує певне паливо і чисельно дорівнює кількості теплоти, що виділяється під час повного згоряння 1 кг цього палива.

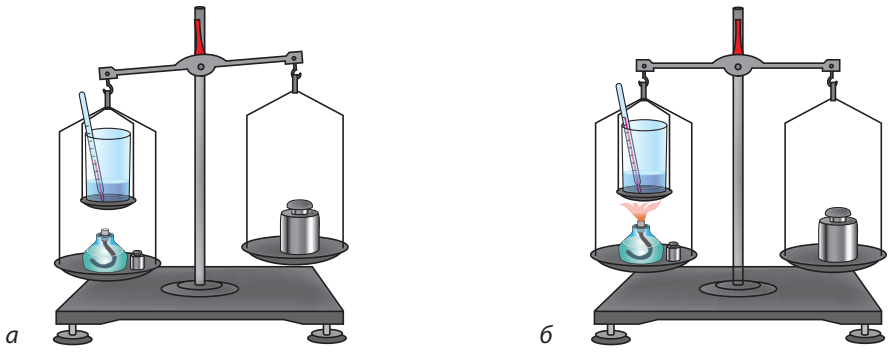


Рис. 15.5. Дослід, за допомогою якого демонструють якісну відмінність різних видів палива

Питому теплоту згоряння палива позначають символом q та обчислюють за формулою:

$$q = \frac{Q}{m},$$

де Q — кількість теплоти, що виділяється в ході повного згоряння палива масою m.

Із формули для означення питомої теплоти згоряння палива дістанемо *одиницю цієї величини в СІ* — **джоуль на кілограм:**

$$[q] = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питому теплоту згоряння різних видів палива визначають у лабораторних умовах і заносять до таблиць (див. табл. 6 *Додатка*).

У табл. 6 *Додатка* бачимо, що, наприклад, питома теплота згоряння торфу становить 15 МДж/кг. Що це означає? Яка кількість теплоти виділиться під час повного згоряння 2 кг торфу?

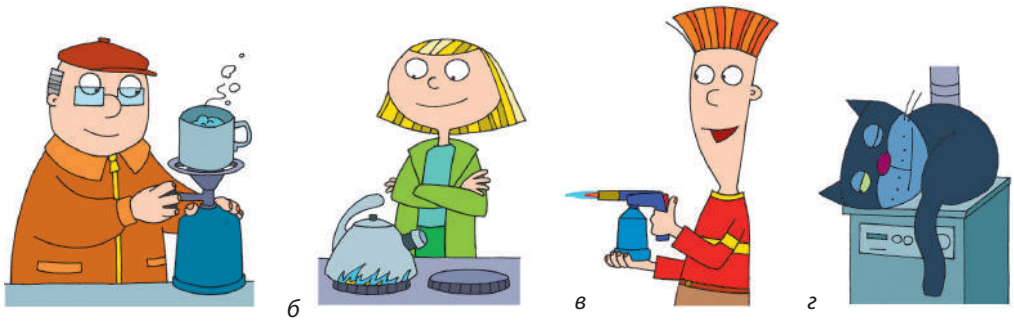
Знаючи питому теплоту згоряння q й масу m палива, обчислимо *кількість теплоти Q, яка виділиться в ході повного згоряння цього палива*: оскільки $q = \frac{Q}{m}$, то

$$Q = qm$$

3 Обчислюємо коефіцієнт корисної дії (ККД) нагрівника

Для спалювання палива використовують різні нагрівники: печі та каміни, газові котли, пальники й спиртівки, примуси, паяльні лампи та інше (рис. 15.6).

Конструкція нагрівника залежить від виду палива, яке в ньому згоряє, і від того, для чого використовують теплоту. Наприклад, якщо потрібно опалювати помешкання, а паливом є газ, то доцільно придбати газовий котел; для фізичних дослідів, під час яких паливом буде спирт, як нагрівник слід обрати спиртівку. Проте навіть за допомогою найсучасніших нагрівників *неможливо повністю використати всю енергію*,



а *б* *в* *г*

Рис. 15.6. Різноманітні нагрівальні пристрої: примус *(а)*; газова плита *(б)*; паяльна лампа *(в)*; газовий котел *(г)*

що «накопичена» в паливі. По-перше, жодне паливо не може в реальних умовах згоріти повністю. По-друге, якась частина енергії витрачається марно (наприклад, відлітає з продуктами згоряння, іде на нагрівання навколишнього середовища).

Коефіцієнт корисної дії нагрівника — це фізична величина, яка характеризує ефективність нагрівника й дорівнює відношенню корисно спожитої теплоти до всієї теплоти, яка може бути виділена під час повного згоряння палива.

ККД нагрівника обчислюють за формулою:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}},$$

де η — коефіцієнт корисної дії нагрівника; $Q_{\text{кор}}$ — корисно спожита теплота; $Q_{\text{повна}}$ — теплота, яка може бути виділена в процесі повного згоряння даного палива.

Зазвичай ККД подають у відсотках:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}} \cdot 100\,\%$$

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Туристи зупинилися на перепочинок біля струмка й вирішили приготувати чай. Яку мінімальну кількість сухих дров слід заготовити туристам, щоб закип'ятити 10 кг води? Вода одержує 15 % енергії, що виділяється під час повного згоряння дров. Температура води в струмку 15 °С.

Дано:

$m_{\text{води}} = 10$ кг

$\eta = 15\,\% = 0{,}15$

$t_0 = 15$ °С

$t = 100$ °С

$c_{\text{води}} = 4200 \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$

$q_{\text{дров}} = 1 \cdot 10^7 \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Знайти:

$m_{\text{дров}}$ — ?

Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі, розв'язання

Для розв'язання задачі скористаємося формулою для обчислення ККД нагрівника:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}. \qquad (1)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання води:

$$Q_{\text{кор}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} \left(t - t_0\right). \qquad (2)$$

Кількість теплоти, яка виділяється під час повного згоряння дров:

$$Q_{\text{повна}} = q_{\text{дров}} m_{\text{дров}}. \qquad (3)$$

Підставивши формули (2) і (3) у формулу (1), дістанемо:

$$\eta = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_0)}{q_{\text{дров}} m_{\text{дров}}} \Rightarrow \eta q_{\text{дров}} m_{\text{дров}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_0) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{дров}} = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_0)}{\eta q_{\text{дров}}}.$$

За нормального атмосферного тиску вода кипить за температури 100 °С. Питому теплоємність води й питому теплоту згоряння дров знайдемо відповідно в табл. 1 і 6 *Додатка*.

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$\left[m_{\text{дров}}\right] = \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{С}} \cdot \text{кг} \cdot {}^\circ\text{С}\right) : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$$

$$m_{\text{дров}} = \frac{4200 \cdot 10 \cdot (100 - 15)}{0{,}15 \cdot 1 \cdot 10^7} = \frac{4200 \cdot 10 \cdot 85}{15 \cdot 10^5} = 2{,}38 \text{ (кг)}.$$

Аналіз результату. Щоб нагріти воду, туристам потрібно 2,38 кг дров. Результат є цілком реальним.

Відповідь: $m_{\text{дров}} = 2{,}38$ кг.

Підбиваємо підсумки

Хімічна реакція горіння палива відбувається з виділенням теплоти. Кількість теплоти, яка виділяється під час повного згоряння палива, обчислюють за формулою $Q = qm$, де q — питома теплота згоряння палива; m — маса палива.

Питома теплота згоряння палива дорівнює кількості теплоти, яка виділяється в процесі повного згоряння 1 кг цього палива. Ця фізична величина є характеристикою теплотворної здатності палива й вимірюється в джоулях на кілограм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

Згоряння палива відбувається в нагрівниках. ККД нагрівника позначають символом η й обчислюють за формулою $\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}$. Зазвичай ККД подають у відсотках: $\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}} \cdot 100\,\%$.

Контрольні запитання

1. Які види палива ви знаєте? **2.** Опишіть дослід на підтвердження того, що під час горіння різних видів палива виділяється різна кількість теплоти. **3.** Яким є фізичний зміст питомої теплоти згоряння палива? У яких одиницях її вимірюють? **4.** Як обчислити кількість теплоти, що виділяється в процесі повного згоряння палива? **5.** Дайте означення ККД нагрівника.

Вправа № 15

1. Питома теплота згоряння пороху набагато менша від питомої теплоти згоряння дров. Чому ж тоді сірник, який горить у вашій руці, є досить безпечним, а коли спалахує та сама маса пороху, то можна серйозно постраждати?
2. Яка кількість теплоти виділиться під час повного згоряння кам'яного вугілля масою 10 кг?
3. У процесі повного згоряння гасу виділилося 92 кДж теплоти. Якою була маса гасу?
4. На спиртівці нагріли 300 г води від 15 до 75 °С. Визначте ККД нагрівника, якщо на нагрівання витрачено 8 г спирту.
5. Чайник, що стоїть на газовому пальнику, містить 2 л води за температури 20 °С. Для нагрівання води витратили 42 г природного газу. До якої температури нагрілася вода, якщо вона одержала 40 % тепла, яке може виділитися під час повного згоряння цього газу.
6. Спробуйте пояснити, чому під час спалювання сирих дров виділяється менша кількість теплоти, ніж під час спалювання тієї самої маси сухих дров.
7. Установіть відповідність між фізичною величиною та виразом для її визначення.

1	Механічна робота	**А**	ρV
2	Шлях	**Б**	Fl
3	Потужність	**В**	vt
4	Потенціальна енергія піднятого тіла	**Г**	A/t
		Д	mgh

Експериментальне завдання

Запишіть план проведення експерименту з визначення ККД нагрівника із сухим пальним. Які прилади та матеріали для цього потрібні? Якщо можливо, проведіть експеримент.

Фізика і техніка в Україні

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича був заснований у 1875 р. указом імператора Австро-Угорщини Франца Йосифа. Тоді в університеті були лише теологічний, філософський та юридичний факультети.

Сьогодні в університеті функціонують 2 інститути, 11 факультетів, 82 кафедри, де навчається майже 15 тисяч студентів. Навчально-наукову роботу забезпечують понад 160 докторів наук (із них 108 професорів), близько 700 кандидатів наук. Серед основних напрямів досліджень, пов'язаних із фізикою, можна назвати теоретичні та прикладні дослідження напівпровідникового матеріалознавства; розроблення нових технологій, матеріалів, приладів для опто-, радіо- та мікроелектроніки, напівпровідникового приладобудування; кореляційну оптику та голографію; IT-технології, зокрема кібербезпеку.

§ 16. ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ. ККД ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

Фізично розвинена людина може за добу виконати роботу, що дорівнює близько 1 млн джоулів. Середньодобове споживання енергії одним жителем Землі є більшим у сотні разів. З усієї енергії, яку споживає людина, близько 90 % становить енергія палива. На обігрівання приміщень і готування їжі йде тільки незначна частина цієї енергії — переважно людина використовує енергію палива, перетворюючи її на механічну. Як це відбувається та за яких умов є можливим таке перетворення?

1 Знайомимося з принципом дії теплових двигунів

Проведемо дослід. Щільно закоркуємо носик чайника і поставимо чайник із водою на пальник газової плити. Через деякий час помітимо, що кришка чайника почне підстрибувати. З'ясуємо, чому так відбувається.

Вода в чайнику починає закипати, тиск пари під кришкою збільшується. У результаті настає момент, коли сила тиску пари стає більшою за силу тяжіння, що діє на кришку, і кришка підстрибує. У цей момент частина пари виходить назовні, сила тиску пари на кришку зменшується і сила тяжіння повертає кришку на місце (рис. 16.1). Якщо нагрівання продовжувати, то *процес повторюватиметься*.

Отже, в описаній системі, яка складається з газового пальника й чайника з кришкою та киплячою водою, *за рахунок енергії, що виділяється внаслідок згоряння палива, виконується механічна робота, при цьому частина енергії віддається довкіллю*.

Якщо з кришкою чайника з'єднати якийсь механізм, дістанемо найпростішу модель *теплового двигуна*.

Тепловий двигун — це теплова машина, яка перетворює енергію палива на механічну роботу.

Крім теплових двигунів, існують інші види теплових машин (докладніше про це йтиметься в старших класах). З'ясуємо на прикладі з чайником, із яких основних частин має складатися теплова машина.

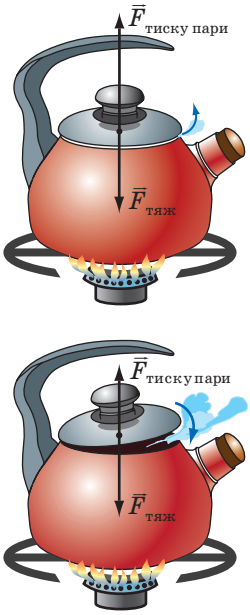


Рис. 16.1. На кришку чайника діють сила тяжіння ($F_{\text{тяж}} = mg$) і сила тиску пари. Якщо $F_{\text{тиску пари}} > F_{\text{тяж}}$, кришка підстрибує; якщо $F_{\text{тиску пари}} < F_{\text{тяж}}$, кришка повертається назад

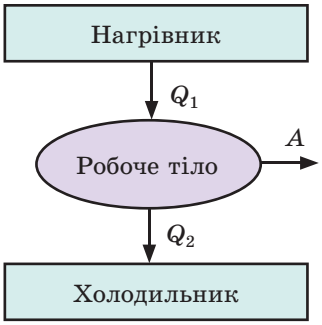


Рис. 16.2. Принцип дії теплових машин: робоче тіло одержує певну кількість теплоти (Q_1) від нагрівника, ця теплота частково перетворюється на механічну енергію (робоче тіло виконує роботу A), а частково (Q_2) передається холодильнику

По-перше, в зазначеній системі механічну роботу виконує пара, яка, розширюючись, піднімає кришку. *Газ, який виконує роботу в процесі свого розширення, називають* **робочим тілом**.

По-друге, пара під кришкою чайника утворюється і розширюється внаслідок нагрівання чайника на газовому пальнику. *Пристрій, від якого робоче тіло одержує певну кількість теплоти, називають* **нагрівником**.

По-третє, виходячи із чайника, водяна пара періодично віддає енергію довкіллю (якби цього не відбувалося, «двигун» не зміг би працювати циклічно — кришка не повертала б у початкове положення і процес не повторювався б). *Об'єкт, якому робоче тіло віддає певну кількість теплоти, називають* **холодильником**.

Будь-яка теплова машина складається з трьох основних частин: нагрівника, робочого тіла, холодильника (рис. 16.2).

2 Визначаємо ККД теплового двигуна

У будь-якому тепловому двигуні лише частина енергії, що «прихована» в паливі, витрачається на виконання роботи, адже паливо згоряє не повністю. До того ж частина виділеної енергії передається довкіллю (втрачається). При цьому втрати енергії в теплових двигунах не обмежуються *тепловими втратами*. Частина енергії також витрачається на виконання роботи проти сил тертя частин і механізмів двигуна. Такі втрати енергії називають *механічними*. Очевидно: чим меншими є теплові й механічні втрати у двигуні, тим менше палива потрібно спалити, щоб отримати ту саму корисну роботу, і тим економічнішим є двигун.

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна — це фізична величина, що характеризує економічність теплового двигуна й показує, яка частина всієї енергії, що «запасена» в паливі, перетворюється на корисну роботу.

Коефіцієнт корисної дії двигуна η обчислюють за формулою:

$$\eta = \frac{A_{кор}}{Q_{повна}},$$

де $A_{кор}$ — корисна робота; $Q_{повна}$ — кількість теплоти, що може виділитися в процесі повного згоряння палива.

Найчастіше ККД подають у відсотках:

$$\eta = \frac{A_{кор}}{Q_{повна}} \cdot 100\,\%$$

Корисна робота завжди менша від кількості теплоти, що виділяється в процесі повного згоряння палива, тому зрозуміло, що ККД теплового двигуна завжди є меншим від 100 %. Зазвичай ККД теплових двигунів становить 20–40 % (рис. 16.3).

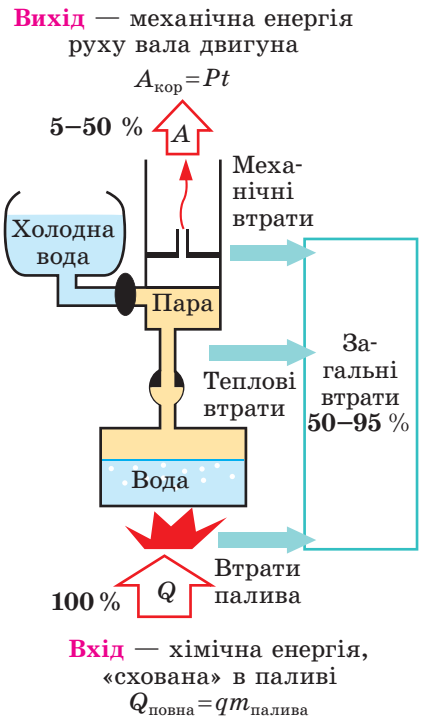


Рис. 16.3. ККД парових теплових двигунів і схема втрат енергії

Підбиваємо підсумки

Тепловий двигун — це машина, яка працює циклічно й перетворює енергію палива на механічну роботу.

Будь-яка теплова машина складається з трьох основних частин: нагрівника, робочого тіла, холодильника.

Принцип дії теплових машин: робоче тіло одержує певну кількість теплоти від нагрівника; частина цієї теплоти перетворюється на механічну енергію (робоче тіло виконує роботу), а частина — віддається холодильнику.

Коефіцієнт корисної дії η двигуна — це фізична величина, що характеризує економічність теплового двигуна й показує, яка частина всієї енергії $Q_{повна}$, що «запасена» в паливі, перетворюється на корисну роботу $A_{кор}$. ККД теплового двигуна обчислюють за формулою

$$\eta = \frac{A_{кор}}{Q_{повна}} \quad \left(\text{або } \eta = \frac{A_{кор}}{Q_{повна}} \cdot 100\,\% \right).$$

Контрольні запитання

1. Що таке тепловий двигун? **2.** Назвіть основні частини теплового двигуна. **3.** У чому полягає принцип дії теплового двигуна? **4.** Назвіть основні види втрат енергії в теплових двигунах. **5.** Дайте означення ККД теплового двигуна. **6.** Чому ККД теплового двигуна завжди менший від 100 %?

Вправа № 16

1. Під час повного згоряння палива в тепловому двигуні виділилося 500 кДж теплоти. У результаті двигун виконав корисну роботу, яка дорівнює 125 кДж. Визначте ККД двигуна.

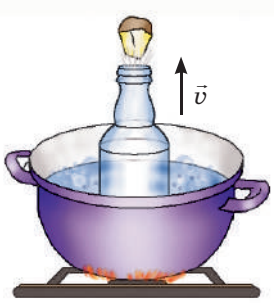
2. Під час роботи теплового двигуна використано 0,5 кг дизельного палива. При цьому двигун виконав корисну роботу, яка дорівнює 7 МДж. Обчисліть ККД двигуна.

3. Яку корисну роботу виконає тепловий двигун, ККД якого становить 20 %, якщо в ньому згорить 10 л бензину?
4. Яку середню потужність розвиває двигун мотоцикла, якщо за швидкості руху 90 км/год витрата бензину становить 4 кг на 100 км шляху? ККД двигуна дорівнює 25 %.
5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про перші теплові машини, створені людиною.

Експериментальне завдання

«*Картопляний постріл*». Візьміть скляну пляшку, ополосніть її водою та закоркуйте картоплиною (обережно втисніть шийку пляшки в картоплину та приберіть залишки картоплини). Поставте закоркована пляшку в каструлю з водою й нагрівайте воду. Через деякий час «корок» вилетить (див. рисунок). Поясніть спостережуване явище.

(*Під час проведення досліду не можна нахилятися над каструлею!*)



Фізика і техніка в Україні

Виробниче об'єднання «Південмаш» і конструкторське бюро «Південне» (Дніпро)

На початку 50-х рр. минулого століття великий автомобільний завод у Дніпропетровську було переобладнано на завод із виробництва космічних ракет, а також створено конструкторське бюро (КБ) для їх розробки. Від того часу КБ «Південне» та завод «Південмаш» багато років визначали світовий рівень основних напрямів і досягнень у ракетно-космічній галузі.

Під керівництвом таких видатних конструкторів, як *В. С. Будник, М. К. Янгель, В. Ф. Уткін, С. М. Конюхов*, у КБ «Південне» було розроблено 67 типів космічних апаратів і 12 космічних комплексів. КБ «Південне» і «Південмаш» створили комплекс «Зеніт» — один із найдосконаліших у світовій ракетно-космічній техніці за конструктивним виконанням і автоматизацією підготовки до пуску; усього було виготовлено та виведено на орбіту понад тисячу космічних апаратів.

§ 17. ДЕЯКІ ВИДИ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ

Історія промислового застосування теплових двигунів починається з парової машини, яку створив англійський учений *Джеймс Ватт* у 1768 р. (рис. 17.1). Протягом декількох років Ватт удосконалював її конструкцію. Від 1776 р. машини Ватта почали широко застосовувати в шахтах і на металургійних заводах Англії. У XX ст. на зміну першим паровим машинам прийшли сучасні двигуни внутрішнього згоряння, парові й газові турбіни, реактивні двигуни. Із цього параграфа ви дізнаєтесь, як працюють деякі з них.

1 Вивчаємо будову та принцип дії парової турбіни

Парова турбіна (від латин. *turbo* — вихор, швидке обертання) — один із прикладів *парових теплових двигунів*.

У парових двигунах *енергія, яка виділяється під час згоряння палива, йде на утворення водяної пари та її нагрівання*, а вже потім *нагріта пара, розширюючись, виконує механічну роботу*.

Отже, робочим тілом парової турбіни є пара, яка утворюється з води й у спеціальних парових котлах нагрівається до температури близько 600 °С. Із котла пара під високим тиском надходить до турбіни.

Що, на вашу думку, слугує холодильником під час роботи турбіни?

Розглянемо принцип дії найпростішої парової турбіни (рис. 17.2). Струмені пари, вихоплюючись через сопла (1), спрямовуються на лопаті (2), закріплені на диску (3). Диск, у свою чергу, нерухомо закріплений на валу (4) турбіни. Під дією пари диск турбіни, а отже, і вал обертаються, тобто пара виконує роботу (рис. 17.3).

Парові турбіни широко використовують на електростанціях, де механічна енергія обертання турбіни перетворюється на електричну. На транспорті парові турбіни не набули широкого застосування в основному через великі габарити.

2 Знайомимося з будовою двигуна внутрішнього згоряння

Одним із найпоширеніших видів теплових двигунів, що використовують у транспортних засобах, є *двигун внутрішнього згоряння*, який сконструював німецький винахідник *Ніколаус Отто* (рис. 17.4).

У процесі роботи двигуна внутрішнього згоряння *паливо згоряє безпосередньо всередині* його циліндрів, звідси й походження назви двигуна. Двигуни внутрішнього згоряння працюють на рідкому паливі або газі.

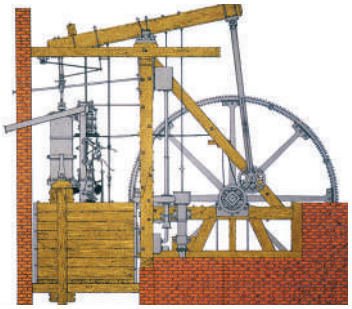


Рис. 17.1. Парова машина Ватта

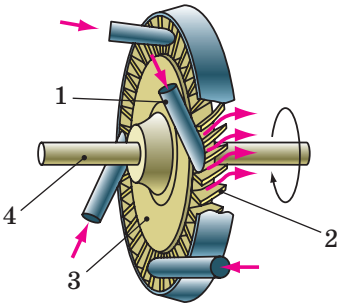


Рис. 17.2. Схема будови найпростішої парової турбіни: 1 — сопла; 2 — лопаті; 3 — диск; 4 — вал. Стрілками позначено напрямок руху пари

Рис. 17.3. У сучасних турбінах для максимального використання енергії пари застосовують кілька дисків з лопатями, які насаджено на один спільний вал

Рис. 17.4. Ніколаус Август Отто (1832–1891), німецький конструктор і підприємець, винахідник чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння з електричним запалюванням

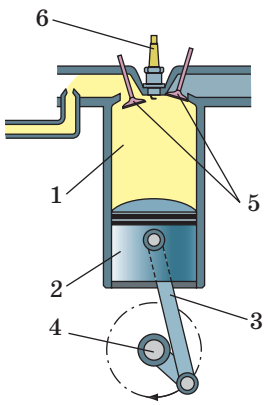


Рис. 17.5. Схема будови найпростішого двигуна внутрішнього згоряння: 1 — циліндр; 2 — поршень; 3 — шатун; 4 — колінчастий вал; 5 — клапани; 6 — запальна свічка. Стрілкою позначено напрямок обертання колінчастого вала

Двигун внутрішнього згоряння (рис. 17.5) складається із *циліндра* (1), в якому переміщується *поршень* (2). Усередині поршня шарнірно закріплений *шатун* (3). Шатун, у свою чергу, з'єднаний із *колінчастим валом* (4), обертання якого забезпечує обертання тягових коліс транспортного засобу.

У верхній частині циліндра є два канали, закриті *клапанами* (5). Через *впускний клапан пальна суміш* (суміш повітря з бензином або газом) надходить до циліндра; через *випускний клапан* викидаються відпрацьовані гази. У деяких двигунів у верхній частині циліндра розміщено також *запальну свічку* (6) — пристрій для запалювання пальної суміші за допомогою електричної іскри.

3 Розглядаємо роботу чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння

Робочий цикл чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння з електричним запалюванням складається відповідно із чотирьох тактів (рис. 17.6).

І такт — усмоктування (рис. 17.6, *а*). Поршень рухається вниз, у циліндрі падає тиск. У цей час відкривається впускний клапан і пальна суміш усмоктується в циліндр. Наприкінці І такту впускний клапан закривається.

ІІ такт — стиснення (рис. 17.6, *б*). Поршень рухається вгору і стискає пальну суміш. Коли поршень доходить до крайнього верхнього положення, проскакує іскра і пальна суміш займається. Обидва клапани закриті.

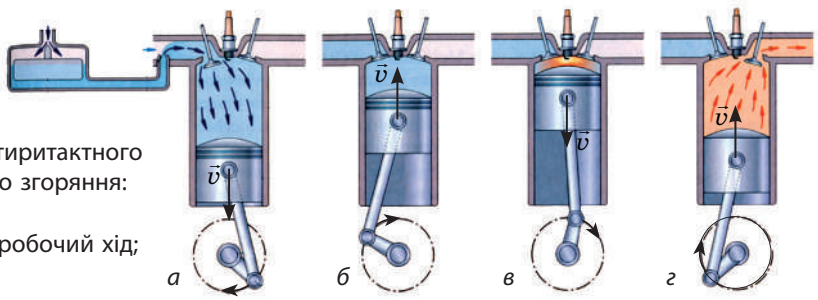


Рис. 17.6. Робота чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння: *а* — усмоктування; *б* — стиснення; *в* — робочий хід; *г* — випускання

III такт — робочий хід (рис. 17.6, *в*). Паливо горить, і розжарені гази штовхають поршень униз. Рух поршня передається шатуну, який штовхає колінчастий вал і примушує його обертатися, — двигун виконує *корисну роботу*. Наприкінці III такту відкривається випускний клапан.

IV такт — випускання (рис. 17.6, *г*). Поршень рухається вгору і через випускну трубу виштовхує продукти згоряння в атмосферу. Наприкінці IV такту випускний клапан закривається. Випускання відпрацьованих газів супроводжується *передачею деякої кількості теплоти довкіллю*.

Як і в будь-якому тепловому двигуні, у двигуні внутрішнього згоряння є *нагрівник* (повітряна суміш, що горить), *робоче тіло* (розжарені гази), *холодильник* (довкілля).

За цикл гази штовхають поршень тільки один раз, тому для рівномірної роботи двигунів ставлять чотири, шість і більше циліндрів.

Рис. 17.7. Рудольф Дізель (1858–1913), німецький інженер. Творець двигуна внутрішнього згоряння із запалюванням від стиснення пальної суміші

Останнім часом дедалі ширше застосовують *дизельні двигуни*, названі на честь німецького інженера *Рудольфа Дізеля* (рис. 17.7). Ці двигуни, зокрема, не мають запальних свічок, вони можуть бути й двотактними, їхній ККД більш високий. У двигунів, описаних вище, ККД становить 20–25 %, у дизельних — 40 %.

4 Розмірковуємо про плюси та мінуси використання теплових двигунів

З огляду на сполуки, які утворюються в результаті хімічних реакцій горіння палива (див., наприклад, рис. 15.1), складається враження, що теплові машини близькі до досконалості, адже продукти реакції є «звичайними» сполуками. Дійсно, вуглекислий газ (CO_2) входить до складу повітря, а вода (H_2O) наявна всюди навколо нас. Ці речовини є екологічно чистими, тобто не забруднюють природу. Проте не слід робити занадто квапливих висновків.

По-перше, практично всі види палива містять невелику кількість сірки, яка із часом перетворюється на шкідливу сульфатну кислоту.

По-друге, на більшості теплових станцій вугілля подається в топки в подрібненому вигляді. Ці частинки, згоряючи, перетворюються на попіл, і певна його кількість розлітається на місцевості, забруднюючи її.

По-третє, в автомобільному двигуні паливо не завжди згоряє повністю, тому у вихлопних газах міститься значна частка отруйного чадного газу (CO).

І це далеко не вичерпний перелік шкідливих чинників!

Забруднення атмосфери — проблема для всього людства. Як боротися з негативними наслідками використання теплових двигунів?

Існує кілька основних напрямів:

1) зменшення (або принаймні збереження на стабільному рівні) сумарної потужності теплових машин. Іншими словами, споживачі енергії (телевізори, холодильники, лампи тощо) мають *використовувати менше енергії*;
2) *зменшення шкідливих викидів теплових електростанцій*. Для цього застосовують, зокрема, спеціальні фільтри;
3) *використання альтернативних джерел енергії*.

Підбиваємо підсумки

Найдавнішим із теплових двигунів, що застосовують у сучасній техніці, є парова турбіна. Роботу в ній виконує нагріта пара, яка за допомогою сопел спрямовується на лопаті турбіни й обертає її.

Ще одним прикладом теплового двигуна є двигун внутрішнього згоряння. У ньому паливо згоряє всередині циліндрів, а нагріте повітря, розширюючись, виконує роботу. Робочий цикл чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння має відповідно чотири такти: усмоктування, стиснення, робочий хід, випускання.

Останнім часом дуже гостро стоїть проблема забруднення навколишнього середовища через шкідливі вияви роботи теплових машин.

Контрольні запитання

1. Які двигуни називають паровими? **2.** Назвіть основні частини парової турбіни. **3.** Опишіть, як працює парова турбіна. **4.** Що в паровій турбіні слугує нагрівником? холодильником? робочим тілом? **5.** Звідки походить назва двигуна внутрішнього згоряння? **6.** Назвіть основні частини двигуна внутрішнього згоряння та їхнє призначення. **7.** Які процеси відбуваються в чотиритактному двигуні внутрішнього згоряння під час кожного з чотирьох тактів? **8.** Доведіть, що теплові двигуни завдають шкідливого впливу на довкілля, і запропонуйте способи розв'язання цієї проблеми.

Вправа № 17

1. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи парової турбіни?
2. ККД найкращих дизельних двигунів із системою турбонадуву з проміжним охолодженням сягає 54,5 %. Яка частина енергії, «запасеної» в паливі, що споживають ці двигуни, витрачається марно?
3. Чому температура пальної суміші в циліндрі дизельного двигуна під час стискання збільшується?
4. Чому в паровій турбіні температура відпрацьованої пари нижча від температури пари, яка надходить на лопаті турбіни?
5. Незважаючи на багато недоліків, теплові двигуни є найпоширенішими. Чому, на вашу думку, люди надають перевагу саме їм?

§ 18. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА. СПОСОБИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

Життєдіяльність сучасної людини на кожному кроці потребує споживання енергії. На жаль, енергії зазвичай не вистачає, тому протягом свого існування людство накопичує знання щодо її економії. Особливо це є актуальним останнім часом, коли стало помітним «дно» світових запасів органічного палива (викопних ресурсів). І саме зараз сформовано декілька загальних принципів енергозбереження та розроблено технології для втілення цих принципів у життя через новітні пристрої та обладнання.

1 Дізнаємося про роль теплоенергетики в житті людини

Протягом багатьох століть паливо було практично єдиним джерелом енергії для людства, інші джерела (вітер і вода) посідали незначне місце.

У XX ст. *альтернативні* джерела енергії стали відігравати помітну роль в енергетиці. Прикладами таких джерел є *гідроелектростанції, атомні електростанції, вітрогенератори, сонячні батареї* (рис. 18.1–18.4).

Альтернативні джерела енергії, розроблення й створення яких потребує значних витрат, виникли «не від доброго життя». Адже саме у XX ст. різко зросло використання теплових машин — пристроїв, що перетворюють енергію палива на інші види енергії (електричну, механічну). Ідеться насамперед про автомобілі та решту транспортних засобів, які використовують як джерело енергії продукти переробки *нафти* (бензин і дизельне паливо). Крім того, практично всюди для обігрівання житла та приготування їжі застосовують пристрої, що спалюють *природний газ*. Цей газ у значній кількості використовують також у виробничих процесах (металургія, хімічний синтез). Газ, нафту, *вугілля* застосовують для вироблення електроенергії на теплових електростанціях.

Як ви знаєте, зазначені види палива є *викопними ресурсами* і їх *запаси обмежені*. Приблизно за 100 років мільйони автомобілів «з'їли» значну кількість світових запасів нафти. Існує думка, що запаси природного газу вичерпаються протягом десь 40 років; розвіданих запасів вугілля вистачить на кількасот років споживання. До того ж для спалювання

Рис. 18.1. Гідроелектростанція (ДніпроГЕС)

вугілля, нафти та газу потрібна велика кількість кисню. Так, щоб спалити 1 кг вугілля, необхідно 2,7 кг кисню, 1 кг нафти — 3,4 кг, 1 кг природного газу (метану) — 4 кг.

2 Розмірковуємо про збереження енергетичних ресурсів

Наведені дані свідчать про те, що через декілька десятків років звичні зараз види палива опиняться на межі зникнення. Що ж робити?

На сьогодні пропонують *три основні напрями розв'язання проблеми майбутнього «енергетичного голоду»*.

1. *Економія наявних викопних ресурсів*. Ідеться про використання нових технічних рішень — *енергозбережувальних технологій*.

2. *Поступова заміна палива з викопних ресурсів на паливо, одержуване з рослин*. Зараз уже використовують два типи технологій виробництва рослинного палива: видобування замінників бензину з рослин, що містять цукор, та перероблення на дизельне паливо олії, одержуваної з деяких рослин (наприклад, ріпаку).

3. *Використання альтернативних джерел енергії*. Насамперед ідеться про *ядерну* енергію. Викопних запасів урану — палива для атомних станцій — вистачить на кілька сотень років. У багатьох країнах (Франція, Україна, США) цей вид виробництва електричної енергії є одним із провідних. Так, в Україні на атомних станціях виробляють близько половини всієї електроенергії.

3 Знайомимося з енергозбережувальними технологіями

Сучасні принципи енергозбереження полягають не лише в застосуванні певних новинок, нехай і унікальних. Принциповим є завдання *комплексного використання кількох технологій*.

Розглянемо звичайну квартиру. Найбільша кількість енергії, що надходить до неї, — це енергія, необхідна для обігрівання. Заміна традиційних вікон на склопакети, утеплення дверей, нанесення спеціального теплозахисного покриття на зовнішні стіни будинку дозволяють зекономити значну кількість тепла, яке зазвичай втрачається на «обігрів довкілля».

Рис. 18.2. Загальний вигляд атомної електростанції (Запорізька АЕС)

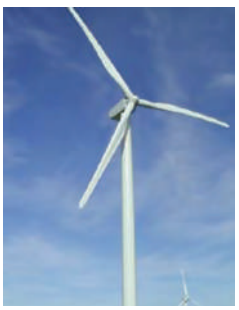


Рис. 18.3. Вітрогенератор

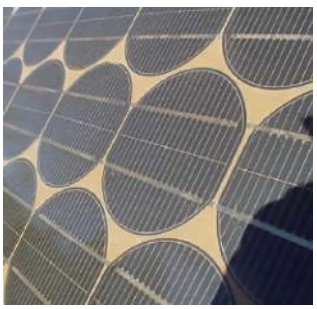


Рис. 18.4. Панель сонячних батарей

Часто гаряча вода надходить до будинків від котелень, які розташовані на відстані в декілька кілометрів. Усю цю відстань гаряча вода проходить по трубах. Такий довгий шлях постачання пов'язаний із великими втратами тепла. Якщо ж обігрівач (електричний або газовий котел) установити у квартирі, то цей шлях складатиме лише кілька метрів. Більш того, котел не тільки нагріває батареї, але й забезпечує гарячу воду для кухні та ванної.

Для економії електричної енергії слід застосовувати економічні лампи та електричні прилади з високим ККД.

Поміркуйте, за рахунок чого ще можлива економія в домівках.

Ми навели простий приклад комплексного підходу до енергозберігання в помешканнях. Аналогічні принципи, тільки зі значно більшим кількісним ефектом, успішно застосовують для виробничих процесів.

4 Дізнаємось, як впливає теплоенергетика на природу

Доки теплові станції не мали великої потужності, а автомобілів було небагато, шкідливість теплових машин не дуже турбувала людство. Проблема стала актуальною в другій половині XX ст., коли з'явилися кислотні дощі, спричинені викидами електростанцій, люди почали задихатися в автомобільних заторах, вдихати разом із повітрям отруйний чадний газ тощо.

Учені пропонують різні технічні вирішення цих проблем. Як приклад наведемо кілька рішень щодо *зменшення викидів бензинових двигунів*:

— видалення зі складу бензину отруйних сполук свинцю;
— «доспалювання» за допомогою спеціальних пристроїв чадного газу до менш шкідливого вуглекислого газу;
— створення екологічно чистих електромобілів (рис. 18.5). Електромобілі практично не забруднюють довкілля: в них використовують електричний двигун, що живиться від акумуляторів;

Рис. 18.5. Зовні електричні автомобілі зовсім не відрізняються від своїх «бензинових братів»

— використання гібридних автомобілів, оснащених двома двигунами — електричним і бензиновим: екологічно чистий електричний двигун доцільно використовувати в місті (де забагато автомобілів), а бензиновий — за містом (де забруднення повітря не є таким небезпечним).

Для людства існує ще одна велика проблема. Річ у тім, що під час роботи теплових машин виділяється вуглекислий газ (CO_2), який у великій кількості стає дуже небезпечним. За оцінками вчених, за 200 років інтенсивної роботи теплових машин в атмосферу було викинуто близько одного трильйона (10^{12}) тонн CO_2. Ця величезна кількість вуглекислого газу спричинила так званий *парниковий ефект* — підвищення температури поверхні Землі. Чому так сталося?

Сонце, як ви знаєте, не тільки освітлює, але й обігріває Землю. Ще сто років тому одержуване Землею тепло практично повністю випромінювалося (поверталося) у космос. Після того як у верхніх шарах атмосфери накопичилася значна кількість вуглекислого газу, цей газ став своєрідним «дзеркалом» для випромінювання з поверхні Землі. У результаті частина енергії затримується в атмосфері й нагріває її.

Через парниковий ефект середня температура поверхні Землі підвищилася на 0,6 °С. Але навіть це невелике нагрівання вже призвело, на думку багатьох учених, до глобальних змін клімату. Якщо ж середня температура поверхні Землі підвищиться на 2 °С, то неминучими стануть глобальні катаклізми: танення льодовиків, піднімання рівня Світового океану, затоплення портових міст та ін.

Щоб уникнути таких катастрофічних наслідків, у 1997 р. в м. Кіото (Японія) уряди багатьох країн підписали так званий Кіотський протокол. Згідно із цим документом для кожної країни світу визначено максимальний об'єм викидів CO_2 (від промислових і побутових джерел разом). Якщо цей об'єм перевищено, то країна-порушник сплачує певну суму штрафу, яку потім використовують для зниження рівня викидів. У 2015 р. Кіотський протокол був доповнений Паризькою угодою, в якій окреслено подальші перспективи обмеження викидів.

Підбиваємо підсумки

Нафта, природний газ і вугілля — це викопні ресурси, запаси яких є вичерпними, обмеженими.

Основні напрями подолання енергетичної кризи:

— економія наявних викопних ресурсів;

— впровадження новітніх технологій з метою зменшення використання палива з вичерпних ресурсів;

— використання альтернативних джерел енергії, насамперед ядерної енергії.

Використання новітніх технологій дозволяє зменшити споживання теплової енергії в кілька разів.

Контрольні запитання

1. Які джерела енергії здавна використовує людство? **2.** Які існують типи альтернативних джерел енергії? **3.** Яка причина безповоротного зменшення викопних ресурсів? **4.** Перелічіть основні напрями подолання енергетичної кризи. **5.** Наведіть приклади енергозбережувальних технологій. **6.** Як впливають теплові джерела енергії на навколишнє середовище? **7.** Що таке Кіотський протокол?

Вправа № 18

1. Основним джерелом енергії на Землі є Сонце. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, де зараз використовується сонячна енергія і де вона може бути використана із часом.

2. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про перспективи розвитку альтернативної енергетики України.

Фізика і техніка в Україні

Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) (Київ)

ІТТФ створено в 1947 р. на базі *Інституту енергетики АН УРСР*. На сьогодні ІТТФ — провідний в Україні центр у галузі тепломасообміну, теплоенергетики та енергозбережувальних теплотехнологій. Робота інституту спрямована на дослідження теплофізичних процесів, розвиток теорії теплопереносу, вимірювання теплових величин. Учені ІТТФ працюють над вирішенням актуальних проблем: підвищення енергоефективності в ході вироблення, транспортування та споживання теплової енергії; комплексна модернізація об'єктів комунальної теплоенергетики шляхом розробки і реалізації регіональних програм, залучення до паливно-енергетичного потенціалу відновлювальних джерел енергії та місцевих видів палива.

У різні роки науковий колектив ІТТФ очолювали видатні вчені: *І. Т. Швець*, *Г. М. Щоголєв*, *В. І. Толубинський*, *Г. Л. Бабуха*, *О. А. Геращенко*, *А. А. Долінський*.

ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «Теплові явища»

У ході вивчення розділу І ви ознайомилися з деякими тепловими процесами, фізичними величинами, що характеризують ці процеси, а також із такими фундаментальними поняттями фізики, як температура та внутрішня енергія.

1. Ви довідалися, що *внутрішню енергію можна змінити двома способами*.

СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

Виконання роботи

- Якщо над тілом виконують роботу, внутрішня енергія тіла збільшується
- Якщо тіло виконує роботу, внутрішня енергія тіла зменшується

Теплопередача

- Енергія самовільно передається від тіла з більшою температурою до тіла з меншою температурою
- Якщо температури тіл є рівними, то теплообмін не відбувається

Теплопровідність

Енергія передається через речовину, але без перенесення речовини

Конвекція

Енергія передається потоками рідини або газу

Випромінювання

Енергія передається електромагнітними хвилями

2. Ви довідалися, що зміну внутрішньої енергії в процесі теплопередачі характеризує фізична величина **кількість теплоти** Q. Як і енергія, кількість теплоти в СІ вимірюється в *джоулях*.

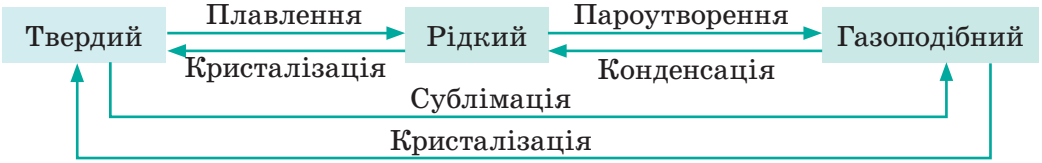
3. Ви дізналися про *рівняння теплового балансу*, яке відтворює *закон перетворення та збереження енергії* під час теплообміну.

РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

В ізольованій системі тіл, у якій внутрішня енергія тіл змінюється тільки внаслідок теплопередачі, загальна кількість теплоти, відданої одними тілами системи, дорівнює загальній кількості теплоти, одержаної іншими тілами цієї системи:

$$Q_1^- + Q_2^- + \ldots + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + \ldots + Q_k^+$$

4. Ви згадали, що існують *три стани речовини*.

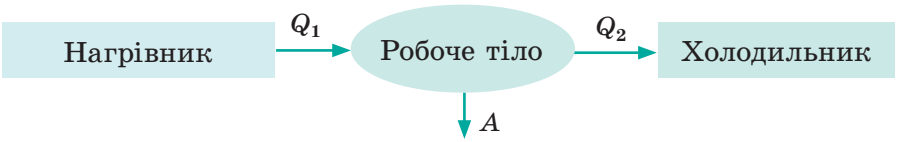


5. Ви дізналися про *фізичні величини, які характеризують теплові властивості речовин*.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця	Формула для визначення
Питома теплоємність	c	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	$c=\frac{Q}{m\Delta t}$
Питома теплота плавлення	λ	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\lambda=\frac{Q}{m}$
Питома теплота пароутворення	r	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$r=\frac{Q}{m}$

6. Ви переконалися, що в процесі згоряння палива *виділяється енергія*, і довідалися, що ця енергія *використовується в роботі* як різних нагрівальних пристроїв, так і теплових двигунів.

ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ МАШИН



7. Ви довідалися про *фізичні величини, які характеризують паливо, нагрівальні пристрої, теплові двигуни*.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця	Формула для визначення
Питома теплота згоряння палива	q	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$q=\frac{Q}{m}$
ККД нагрівника	η	%	$\eta=\frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}\cdot 100\%$
ККД теплового двигуна	η	%	$\eta=\frac{A_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}\cdot 100\%$

Завдання для самоперевірки до розділу І «Теплові явища»

Частина 1. Температура. Внутрішня енергія. Теплопередача

У завданнях 1–5, 7 виберіть одну правильну відповідь.

1. (*1 бал*) Під час охолодження тіла зменшується:
а) кількість його молекул;
б) маса його молекул;
в) розмір його молекул;
г) швидкість руху його молекул;

2. (*1 бал*) Після вимкнення герметично закритої електричної духовки температура повітря в ній зменшилася. Чи змінилася при цьому внутрішня енергія повітря, і якщо змінилася, то як і чому?
а) не змінилась;
б) зменшилася внаслідок теплопередачі;
в) збільшилася внаслідок теплопередачі;
г) зменшилася внаслідок виконання роботи.

3. (*1 бал*) Унаслідок якого із зазначених процесів внутрішня енергія повітря в повітряній кульці зменшується?
а) кульку надули;
б) кулька лопнула;
в) кульку занесли в тепле приміщення;
г) кулька повільно опустилася на підлогу.

4. (*1 бал*) Мідна деталь під час нагрівання розширюється. При цьому збільшується:
а) відстань між атомами міді;
б) розмір атомів міді;
в) кількість атомів у деталі;
г) густина міді.

5. (*2 бали*) Яка кількість теплоти виділиться під час охолодження 2 кг алюмінію на 50 °С?
а) 92 кДж; б) 100 кДж; в) 420 кДж; г) 920 кДж.

6. (*2 бали*) Спекотного літнього дня хлопець і дівчинка одягнені в бавовняний одяг (рис. 1). Чому дівчинка почувається комфортніше?

7. (*2 бали*) Коли деякій речовині масою 100 г було передано 750 Дж теплоти, її температура збільшилася від 25 до 40 °С. Яка це речовина?
а) алюміній; б) залізо; в) сталь; г) срібло.

8. (*2 бали*) Одна людина перебуває на Крайній Півночі, друга — в пустелі. Обидві одягнені «тепло» (рис. 2). Поясніть чому.

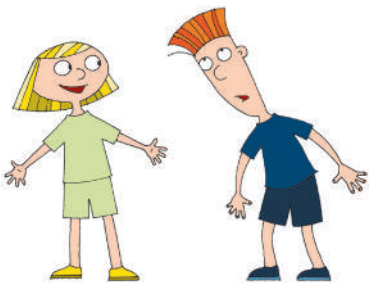
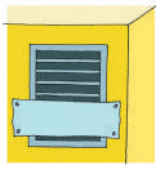


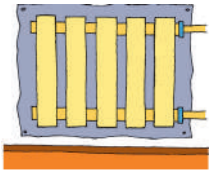
Рис. 1

Рис. 2

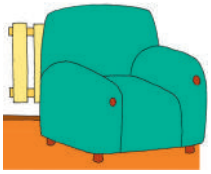
9. (*2 бали*) Які з наведених дій приведуть до теплозбереження? Позначте *всі* правильні відповіді.



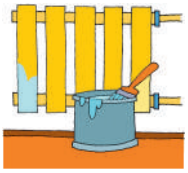
а) прикриття вентиляційної решітки



б) розміщення за радіатором відбивального екрана з алюмінію



в) закриття радіатора меблями або шторами



г) фарбування радіатора у світлий колір

10. (*3 бали*) У чавунному казані масою 2 кг міститься 1,5 л води. Яку кількість теплоти одержить казан з водою в ході нагрівання від 10 до 60 °С?

11. (*3 бали*) За даними рис. 3 обчисліть кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання зображеного сталевого циліндра від 0 до 12 °С.

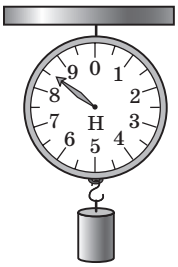


Рис. 3

12. (*3 бали*) На скільки градусів можна нагріти 510 г міді, якщо використати ту саму кількість теплоти, яка виділяється під час охолодження 2 л олії від 60 до 20 °С?

13. (*4 бали*) Відомо, що за температури навколишнього середовища 20 °С кожен кілограм тіла людини за 1 с випромінює в середньому 1,6 Дж теплоти. На скільки градусів можна нагріти 1 л води, якщо передати воді теплоту, яку виділяє учень масою 49 кг за урок (45 хв)?

14. (*4 бали*) З якої висоти падала свинцева куля, якщо внаслідок удару об сталеву плиту вона нагрілася на 2,5 °С? Вважайте, що початкова швидкість руху кулі дорівнювала 0, а на нагрівання кулі було витрачено 80 % її початкової потенціальної енергії.

15. (*4 бали*) Визначте, якою була початкова температура латунного циліндра (рис. 4), якщо після його занурення вода в мензурці охолола від 37 до 20 °С. Втратами енергії знехтуйте.

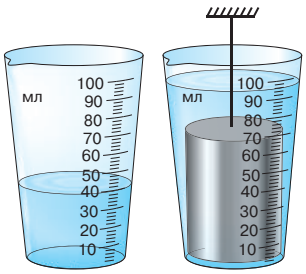


Рис. 4

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Частина 2. Зміна агрегатного стану речовини. Теплові двигуни

У завданнях 1–8, 10 виберіть одну правильну відповідь.

1. (*1 бал*) Яка з поданих речовин за кімнатної температури зберігає об'єм, але не зберігає форми?
а) сталь; б) кисень; в) гелій; г) ртуть.

2. (*1 бал*) Газ легко стиснути, тому що молекули газу:
а) зіштовхуються одна з одною;
б) майже не взаємодіють одна з одною;
в) перебувають у безперервному хаотичному русі;
г) розташовані доволі далеко одна від одної.

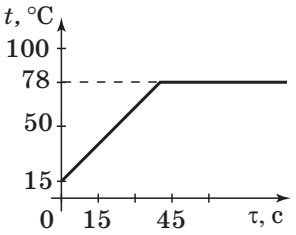
3. (*1 бал*) Коли речовина переходить з одного агрегатного стану в інший, змінюється:
а) маса молекул;
б) розмір молекул;
в) характер руху та взаємодії молекул;
г) склад молекул.

4. (*1 бал*) Під час кристалізації температура речовини:
а) залишається незмінною;
б) зменшується;
в) збільшується;
г) для одних речовин збільшується, для інших — зменшується.

5. (*2 бали*) Газ у закритій посудині стиснули, зменшивши його об'єм удвічі. У результаті цього:
а) кількість молекул газу в посудині зменшилася вдвічі;
б) густина газу збільшилася вдвічі;
в) маса газу зменшилася вдвічі;
г) середня відстань між молекулами збільшилася вдвічі.

6. (*2 бали*) Яку речовину можна розплавити в посудині зі свинцю?
а) залізо; б) мідь; в) олово; г) вольфрам.

7. (*2 бали*) У лабораторних умовах за нормального атмосферного тиску проводили дослідження залежності температури деякої рідини від часу її нагрівання. Результати дослідження подали у вигляді графіка (див. рисунок). Визначте досліджувану рідину.



а) вода; в) олія;
б) ефір; г) спирт.

8. (*2 бали*) Яку кількість теплоти необхідно витратити для плавлення 5 кг алюмінію, взятого за температури плавлення?
а) 3 кДж; б) 607 кДж; в) 1965 кДж; г) 3036 кДж.

9. (*3 бали*) Установіть відповідність між тепловим процесом, який відбувається з певною речовиною, і формулою для визначення кількості теплоти, яку виділяє речовина в ході цього процесу.

1 Вода в калюжі перетворилася на лід.	**А** $Q=qm$
2 Господар запалив дрова в каміні.	**Б** $Q=rm$
3 Над річкою утворився туман.	**В** $Q=\lambda m$
	Г $Q=cm\Delta t$

10. (*2 бали*) Визначте, скільки гасу потрібно спалити, щоб отримати 92 МДж теплоти. Вважайте, що гас згоряє повністю.
а) 450 г; б) 500 г; в) 2 кг; г) 100 кг.

11. (*2 бали*) Нормальна температура в пахвах людини дорівнює 36,8 °С, а в легенях — 32 °С. Чим, на вашу думку, зумовлена нижча температура в легенях?

12. (*2 бали*) Чому температура пальної суміші в циліндрі двигуна під час стискання збільшується, а під час робочого ходу — зменшується?

13. (*2 бали*) У газовому нагрівнику під час згоряння 2,5 кг природного газу було отримано 82,5 МДж теплоти. Визначте ККД нагрівника.

14. (*3 бали*) Ефір масою 20 г за температури 15 °С повністю випарувався. Яку кількість теплоти поглинув ефір під час цього процесу?

15. (*3 бали*) На скільки градусів можна нагріти 10 кг міді, використавши кількість теплоти, яка може виділитися під час повного згоряння 100 г дров?

16. (*4 бали*) У залізній коробці масою 200 г міститься 100 г свинцю за температури 27 °С. Яку масу природного газу потрібно спалити, щоб розплавити свинець? Вважайте, що на нагрівання коробки зі свинцем витрачається 40 % енергії, яка може виділитися в ході повного згоряння газу.

17. (*4 бали*) Автомобіль, рухаючись із середньою швидкістю 144 км/год, витратив 8 кг дизельного палива на 100 км шляху. Визначте середню потужність і середню силу тяги двигуна автомобіля на всьому шляху, якщо його ККД 30 %.

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Що таке теплові трубки

Ви вже знаєте, що метали є дуже гарними провідниками тепла, а серед металів «рекордсменами» є срібло, мідь, золото, алюміній. І коли у вас запитають: «Як найшвидше передати тепло з однієї ділянки до іншої?», — ви, безумовно, згадаєте: якщо один кінець металевого стрижня розташувати в гарячому місці, то другий його кінець швидко нагріється. А чи можна передати тепло швидше, ніж за допомогою цих металів? Нібито ні, адже ці метали недаремно називають рекордсменами. Проте інженери розв'язали й таке завдання, а винайдений пристрій назвали *тепловою трубкою*.

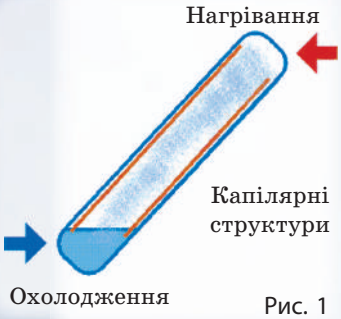


Рис. 1

Пояснимо принцип дії теплової трубки (рис. 1). Візьмемо запаяну трубку з невеликою кількістю води всередині. Верхній кінець трубки помістимо в гаряче місце. Крапельки води, що залишилися на внутрішній поверхні цієї частини трубки, почнуть перетворюватися на пару. Молекули пари «полетять» у всі боки, у тому числі вниз, де і сконденсуються в ділянці холодного кінця трубки. Теплота, що поглинається під час випаровування води, є дуже великою, тому передача тепла в трубці відбувається надзвичайно ефективно.

На жаль, конструкція має суттєвий недолік — «одноразовість»: крапельки води випаровуються, і процес передачі тепла зупиняється. Для розв'язання цієї проблеми інженери скористалися так званим *капілярним ефектом*. (Згадайте: якщо край сорочки або сукні потрапить у воду, то мокрим стає не тільки він, але й тканина навколо.)

Капілярні структури розмістили вздовж внутрішніх стінок теплової трубки (червона смуга на рис. 1), і трубка стала «багаторазовою». У такому пристрої вода рухається «по колу»: на гарячому кінці трубки (угорі) вода випаровується, пара переноситься вниз і конденсується в холодній частині трубки; утворена вода капілярами надходить угору, знову випаровується і т. д.

Для розв'язання конкретних завдань трубки виготовляють із металу, а капіляри роблять у вигляді або дротяного джгута (рис. 2), або напилених мікрочастинок (рис. 3).

Теплові трубки є дуже поширеними. Так, теплову трубку, подібну до наведеної на рис. 2, застосовують для охолодження персональних комп'ютерів.

Несподіване застосування теплові трубки мають на Алясці. На рис. 4 показано ділянку газопроводу, побудованого на території вічної мерзлоти. Під час перекачування газу відбувається його певне розігрівання, тепло передається на трубу, а частина цього тепла нагріває опори і йде в землю. Якщо теплової енергії передавати багато, то ділянка вічної мерзлоти навколо опори розтане і виникне ризик аварії. Конструктори розв'язали проблему, обладнавши кожну опору тепловими трубками (білі стрижні на рис. 4), завдяки яким надлишкове тепло прямує вгору, в атмосферу.

Рис. 2

Рис. 3

Рис. 4

Ефект «пам'яті форми»

У XX ст. фізики виявили надзвичайно цікаве явище, що згодом набуло широкого застосування. Ідеться про так званий *ефект «пам'яті форми»*. У чому ж полягає його сутність?

Скористаємося простим прикладом. Ефект «пам'яті форми» властивий деяким сплавам, найвідомішим із яких є нітинол — сплав нікелю й титану. Візьмемо довгий стрижень, виготовлений з нітинолу, нагріємо і в гарячому стані надамо йому будь-якої форми, скажімо, згорнемо у вигляді кільця. Потім дамо стрижню охолонути до кімнатної температури й надамо йому іншої форми, тобто не кільця, — наприклад, розпрямимо його або згорнемо у вигляді будь-якої іншої фігури. Якщо ж тепер знову нагріти стрижень, то він, ніби жива істота, «згадає» свою історію і самостійно набуде початкової форми, тобто в цьому випадку зігнеться в кільце. Більш того, стрижень надовго «зберігає пам'ять» про свою початкову форму й може набувати її за певних умов багато разів. Саме це явище й називають ефектом «пам'яті форми». Його широко застосовують у техніці. Наприклад, на рис. 5 показано кінцівку робота. «Пальці», виготовлені зі сплаву, якому властивий ефект «пам'яті форми», були зігнуті в гарячому стані. «Суглоби пальців» являють собою електричні нагрівники, і якщо пропустити через них струм, то «суглоби» нагріються і «п'ясть» стиснеться в кулак.

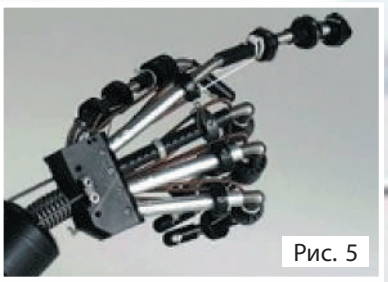


Рис. 5

Орієнтовні теми проєктів

1. Екологічні проблеми теплоенергетики та тепловикористання.
2. Енергозбережувальні технології.
3. Унікальні фізичні властивості води.
4. Рідкі кристали та їх використання.
5. Полімери.
6. Холодильні машини.
7. Кондиціонери, теплові насоси.

Теми рефератів і повідомлень

1. Адаптація рослин до високих температур.
2. Випаровування і конденсація в живій природі.
3. Застосування випаровування і конденсації в техніці.
4. Конвекція в природі.
5. Як, коли і чому відбуваються такі природні явища: дощ, туман, сніг, роса, град.
6. Чому «плачуть» вікна?
7. Способи зберігання тепла в приміщеннях.
8. «Дива кулінарії» та закони фізики.
9. Аморфні речовини.
10. Рідкі кристали, їх особливості та використання.
11. Історія створення наноматеріалів.
12. Нанотехнології в медицині та косметології: «за» і «проти».
13. Внесок українських учених у розвиток нанотехнологій.
14. Теплове випромінювання тіла людини.
15. Вплив теплових двигунів на навколишнє середовище.
16. Глобальне потепління — загроза людству?
17. Альтернативні джерела енергії.
18. Побутові пристрої, які працюють за рахунок енергії сонячного випромінювання.

Теми експериментальних досліджень

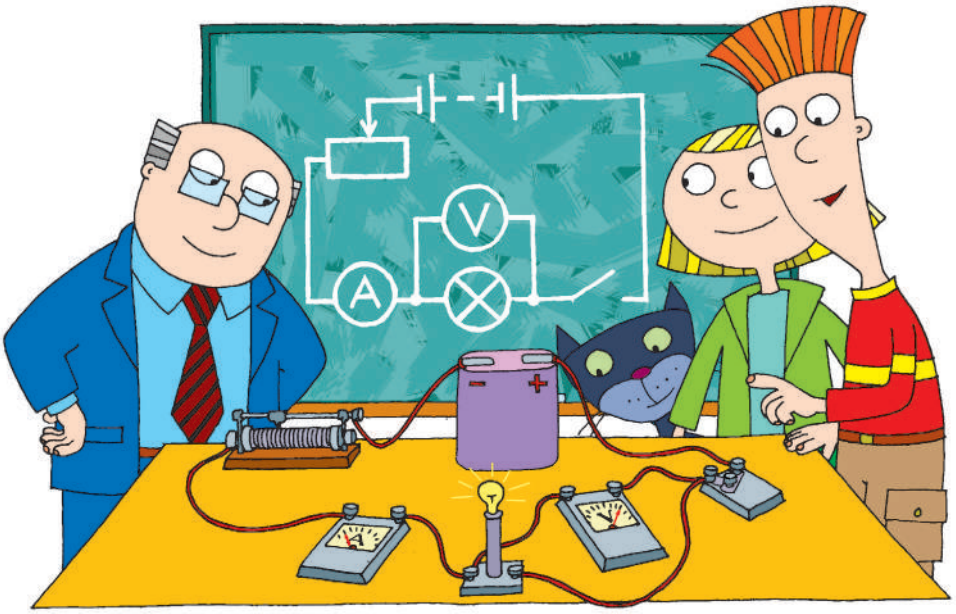
1. Вивчення теплопровідності різних матеріалів.
2. Вирощування кристалів із різних видів солей.
3. Дослідження кипіння води та залежності зміни температури кипіння води від зовнішнього тиску й наявності домішок.
4. Створення «холодильників», які не використовують електроенергію.
5. Створення двигуна, який використовує енергію свічки.

Перед початком роботи над проєктом, рефератом, проведенням експериментального дослідження уважно ознайомтеся з порадами в інтернет-підтримці підручника.

РОЗДІЛ II

ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

- Ви бачили, що наелектризоване волосся притягується до гребінця, а тепер з'ясуєте, чому та коли це відбувається
- Ви багато разів користувалися електричними пристроями, а тепер дізнаєтеся, що називають електричним колом, і зможете його скласти
- Ви знаєте про існування електричного струму, а тепер довідаєтеся, за яких умов він може існувати
- Ви щодня споживаєте електричну енергію, а тепер навчитеся розраховувати її кількість і вартість
- Ви неодноразово спостерігали блискавку, а тепер зможете пояснити, чому вона виникає і як від неї вберегтися



ЧАСТИНА 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

§ 19. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ВЗАЄМОДІЯ

Гірничі інженери та військові називають зарядом вибухівку; інколи слово «заряд» використовують для визначення «запасу почуттів» (заряд бадьорості). А що таке електричний заряд?

1 Знайомимося з електромагнітною взаємодією

Будову атома — елементарного складника будь-якої речовини — ви вже вивчали в курсах природознавства, фізики, хімії. Отже, згадаємо: атом будь-якої речовини складається з ядра, навколо якого розташовані електрони.

Зрозуміло, що без взаємного притягання електронів і ядра атом розпався б. Можна було б припустити, що таке притягання зумовлене гравітаційною взаємодією. Але це не так: електрони та ядро занадто легкі, гравітаційна взаємодія між ними дуже слабка і є недостатньою для того, щоб утримати електрони біля ядра. Доведено, що атом не розпадається завдяки взаємодії іншого типу — її називають **електромагнітною взаємодією.**

Але ж ядро й електрони, з яких складається атом, відкриті порівняно недавно, близько 100 років тому. Невже науковці не знали про існування електромагнітної взаємодії раніше? Звичайно ж, знали.

Понад двадцять п'ять сторіч тому давньогрецький філософ, математик, дослідник природи *Фалес* (бл. 625 — бл. 547 до н. е.) із міста Мілета натирав хутром шматок бурштину і спостерігав, як після цього бурштин починав притягувати до себе пір'я птахів, пух, соломинки, сухе листя. Саме від грецької назви бурштину — *електрон* — процес, у результаті якого тіла набувають властивості притягувати до себе інші тіла, назвали *електризацією* тіл, а тіла, що мають цю властивість, — *наелектризованими*.

З повсякденного життя ми добре знаємо, що після розчісування сухого волосся пластмасовим гребінцем останній набуває властивості притягувати до себе волосся, ворсинки, клаптики паперу тощо. Аналогічної властивості набуває ебонітова паличка в результаті тертя об вовну або паличка з оргскла, якщо її потерти об шовк чи папір (рис. 19.1).

2 Дізнаємося про електричний заряд

Досліди показують, що наелектризовані тіла притягують не тільки легкі ворсинки, соломинки, клаптики паперу, але й металеві предмети, грудочки землі й навіть тоненькі струмені води або олії. Зверніть увагу, що інтенсивність електромагнітної взаємодії може бути різною. Так, у досліді, зображеному на рис. 19.2, *а*, струмінь води відхиляється більше, ніж у досліді на рис. 19.2, *б*.

Проведіть подібні досліди. Замість палички зручно використати пластмасовий гребінець, наелектризувавши його розчісуванням волосся.

Щоб мати можливість кількісно визначати інтенсивність електромагнітної взаємодії, було введено фізичну величину — *електричний заряд*.

Електричний заряд — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок і тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

Електричний заряд позначають символом q. *Одиниця електричного заряду в СІ* — **кулон** (названа на честь французького фізика *Шарля Кулона*): $[q] = 1$ Кл.

Ця одиниця — похідна від основних одиниць СІ (визначення кулона подано в § 27).

Про наелектризоване тіло говорять, що *тілу надано електричний заряд — тіло заряджене*.

Електризація — це процес набуття макроскопічними тілами електричного заряду.

3 Вивчаємо основні властивості електричного заряду

1. Існують *два роди електричних зарядів* — **позитивні** і **негативні**. Електричний заряд такого роду, як заряд, отриманий на бурштині або ебонітовій паличці, потертих об вовну, прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці зі скла, потертій об шовк або папір, — позитивним.

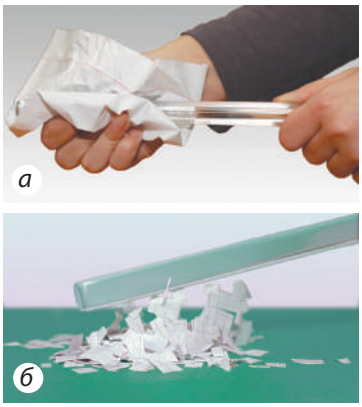


Рис. 19.1. Щоб наелектризувати паличку з оргскла, достатньо потерти її аркушем паперу (*а*). Після нетривалого тертя паличка починає притягувати до себе різні дрібні предмети (*б*)

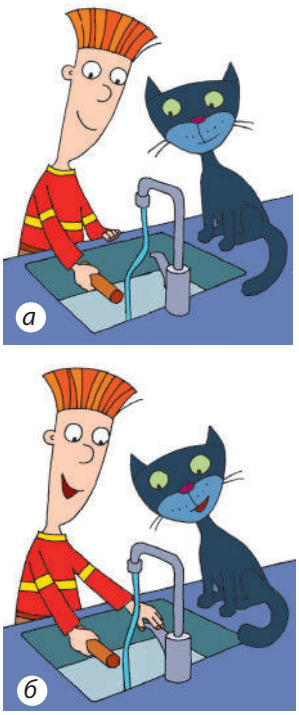


Рис. 19.2. Інтенсивність електромагнітної взаємодії наелектризованої палички та струменя води може бути різною

2. Тіла, що мають *заряди одного знака, відштовхуються;* тіла, що мають *заряди протилежних знаків, притягуються* (рис. 19.3).

3. Носієм електричного заряду є частинка — *електричний заряд не існує окремо від частинки*. Під час електризації тіло приймає або віддає деяку кількість частинок, що мають електричний заряд*. Однією з негативно заряджених частинок є *електрон*, а однією з позитивно заряджених — *протон* (протони входять до складу атомного ядра).

Зазвичай під час електризації тіло приймає або віддає деяку кількість електронів.

4. *Електричний заряд є дискретним, тобто електричні заряди фізичних тіл кратні певному найменшому (елементарному) заряду:*

$$|q| = N|e|,$$

де q — заряд фізичного тіла; N — натуральне число; e — елементарний заряд.

Носієм елементарного негативного заряду є електрон. Цей заряд позначають символом e, а значення записують так: $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл**. Носієм елементарного позитивного заряду є протон. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона: $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

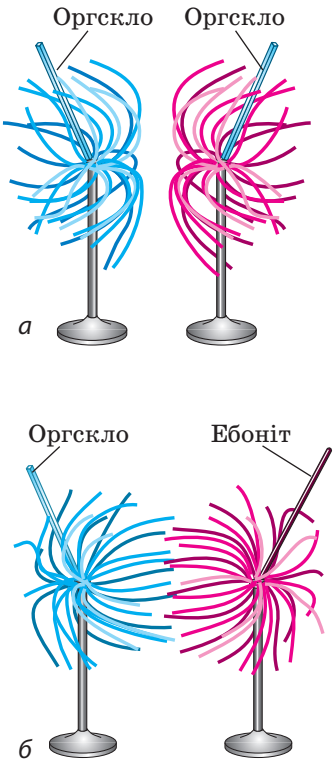


Рис. 19.3. Однойменно заряджені паперові смужки відштовхуються (*а*); різнойменно заряджені — притягуються (*б*)

Як ви вважаєте, чи може фізичне тіло мати заряд $0{,}5e$? $-17{,}7e$? $198e$?

5. І мікрочастинки, і макроскопічні тіла *можуть мати заряд* (позитивний або негативний), *а можуть бути нейтральними*. Наприклад, нейтральними частинками — частинками, заряд яких дорівнює нулю, — є *нейтрони* (вони разом із протонами складають ядро атома). До складу атомів входять протони та електрони, які мають заряд, проте самі атоми є нейтральними, оскільки в них кількість електронів збігається з кількістю протонів.

Підбиваємо підсумки

Електричний заряд — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок і тіл вступати в електромагнітну взаємодію. Заряд позначають символом q і вимірюють у кулонах (Кл).

* Далі частинки, які мають електричний заряд, називатимемо *зарядженими частинками*.

** $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — це приблизне значення елементарного заряду, округлене до десятих. На сьогоднішній день за допомогою сучасних приладів значення елементарного заряду визначено з більшою точністю.

Процес набуття електричного заряду макроскопічними тілами називають електризацією. Під час електризації тіло зазвичай приймає або віддає деяку кількість електронів.

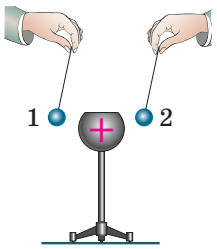
Розрізняють два роди електричних зарядів: позитивні і негативні. Однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменно заряджені — притягуються.

Електричний заряд є дискретним: існує мінімальний (елементарний) електричний заряд, якому кратні всі електричні заряди тіл і частинок. Електричний заряд не існує окремо від частинки; носієм елементарного негативного заряду є електрон, позитивного — протон.

Контрольні запитання

1. Що називають електричним зарядом? **2.** Назвіть одиницю електричного заряду. **3.** Які роди зарядів існують? **4.** Який рід заряду має ебонітова паличка, потерта об вовну? паличка зі скла, потерта об шовк? **5.** Як взаємодіють тіла, що мають однойменні заряди? різнойменні заряди? **6.** З яких частинок складається атом? **7.** Які частинки входять до складу атомного ядра? **8.** Яка частинка має найменший негативний заряд? найменший позитивний заряд? **9.** Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?

Вправа № 19



1. На рисунку зображено позитивно заряджене тіло й підвішені на нитках кульки 1 і 2, що мають заряди невідомих знаків. Визначте знаки зарядів кульок 1 і 2.

2. На тонкій шовковій нитці висить заряджена паперова кулька. Як, маючи ебонітову паличку та шматок вовни, визначити знак електричного заряду кульки?

3. Атом, ядро якого має 12 протонів, утратив 2 електрони. Скільки електронів залишилося в атомі?

4. Скільки надлишкових електронів має бути передано тілу, щоб воно отримало заряд, який дорівнює –1 Кл?

5. Скориставшись додатковими джерелами інформації або власним досвідом, наведіть декілька цікавих прикладів взаємодії заряджених тіл.

6. Визначте силу, з якою тіло масою 5 г притягується до Землі. Яку назву має ця сила? Виконайте схематичний рисунок, на якому зазначте напрямок дії та точку прикладання цієї сили.

Експериментальне завдання

Складіть план дослідження характеру взаємодії заряджених тіл. Як об'єкти для дослідження візьміть паперову та поліетиленову смужки розміром близько 4×15 см, поліетиленову смужку розміром 2×3 см, підвішену на нитці, пластмасову ручку. Проведіть відповідний експеримент.

Фізика і техніка в Україні

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (ХНУ), заснований у листопаді 1804 р., — один із найстаріших університетів Східної Європи. Історія ХНУ є невід'ємною частиною інтелектуальної, культурної та духовної історії нашої країни. З Харківським університетом пов'язані імена таких усесвітньо відомих науковців та просвітителів, як *П. П. Гулак-Артемо́вський, О. М. Ляпунов, М. І. Костомаров, М. П. Барабашов, М. М. Бекетов, Д. І. Багалій, А. М. Краснов, М. В. Остроградський, В. А. Стеклов, О. О. Потебня, О. В. Погорєлов* та багато інших. Харківський університет — єдиний в Україні, де навчались або працювали три лауреати Нобелівської премії — біолог *І. І. Мечников*, фізик *Л. Д. Ландау*, економіст *Саймон Кузнець*.

§ 20. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Згадайте, як під час розчісування сухе й чисте волосся «тягнеться» за пластмасовим гребінцем. У цьому випадку відбувається електризація: і волосся, і гребінець набувають електричного заряду. А ось чому волосся навіть на відстані повторює рухи гребінця (немов кобра — рухи дудки індійського факіра), ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 Спостерігаємо взаємодію заряджених тіл

Із § 19 ви довідалися, що заряджена паличка притягує незаряджені клаптики паперу. Якщо ви проводили відповідний експеримент, то, напевно, звернули увагу на те, що клаптики паперу «відчували» наближення палички заздалегідь, ще до того, як паличка їх торкалася. Тобто заряджена паличка діє на інші об'єкти на відстані!

Проведемо ще один експеримент. Нам знадобляться натерта графітом маленька повітряна кулька*, підвішена на шовковій нитці, ебонітова паличка, шматок вовняної тканини, аркуш паперу та пластина з оргскла.

Наелектризуємо ебонітову паличку, потерши її об вовну. Потім торкнемося паличкою до підвішеної на нитці кульки — кулька отримає негативний заряд. Потремо пластину з оргскла папером — пластина набуде позитивного заряду. Почнемо повільно підносити пластину до кульки. У міру її наближення нитка, на якій підвішена кулька, почне відхилятися від вертикалі. Якщо ж зупинити зближування, то кулька

* Дуже м'яким простим олівцем замалюйте клаптик паперу і натріть цим клаптиком кульку.

так і залишиться неприродно відхиленою (рис. 20.1, *а*). Понад те, піднявши пластину над кулькою, ми можемо змусити кульку завмерти в ще більш неприродному для неї положенні (рис. 20.1, *б*). Що ж відбувається? Чому кулька так поводиться? Висновок очевидний: на кульку — крім сили тяжіння та сили натягу нитки — з боку наелектризованої пластини діє третя сила (на рисунку — $\vec{F}_{ел}$).

2 Даємо означення електричного поля

З описаного вище експерименту можна зробити висновок про те, що *наелектризована пластина викликає певні зміни в просторі навколо себе*. А саме: стан простору змінюється таким чином, що на заряджену кульку починає діяти деяка сила. У цьому випадку кажуть, що *в просторі існує електричне поле*.

Електричне поле — це особлива форма матерії, що існує навколо заряджених тіл або частинок і діє з деякою силою на інші частинки або тіла, які мають електричний заряд.

Таким чином, електрична взаємодія наелектризованої пластини й зарядженої кульки здійснюється за допомогою електричного поля. Коли заряджена кулька потрапляє в електричне поле наелектризованої пластини, це поле починає діяти на кульку з деякою силою, в результаті чого кулька відхиляється.

Силу, з якою електричне поле діє на заряджені частинки або тіла, називають *електричною силою* $\vec{F}_{ел}$.

Слід мати на увазі, що не тільки заряджена пластина своїм електричним полем діє на заряджену кульку, — кулька своїм електричним полем теж діє на пластину.

Поясніть, чому пластина при цьому не відхиляється.

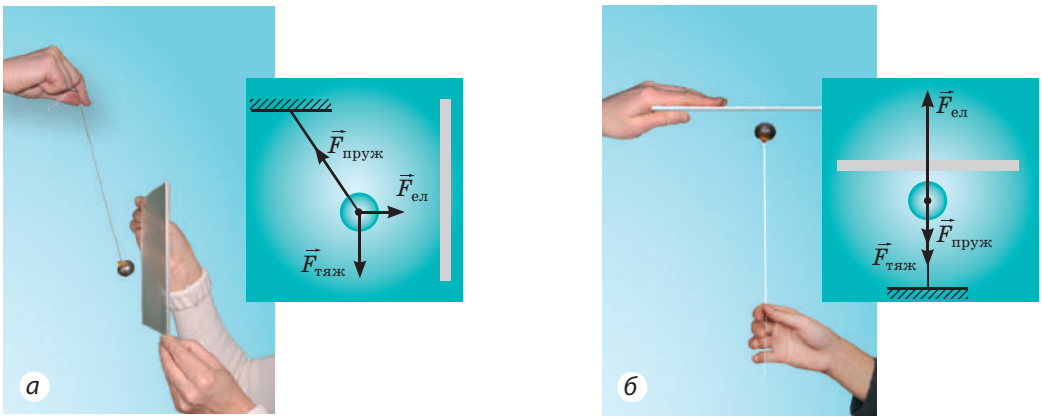


Рис. 20.1. Негативно заряджена кулька притягується до позитивно зарядженої пластини з оргскла. Кулька перебуватиме в спокої, коли сила тяжіння $\vec{F}_{тяж}$ і сила натягу нитки $\vec{F}_{пруж}$ будуть скомпенсовані силою $\vec{F}_{ел}$, яка діє на кульку з боку наелектризованої пластини

3 Характеризуємо електричне поле

Органи чуттів людини не сприймають електричне поле зарядженого тіла — ми не можемо це поле побачити, почути, відчути на дотик. А як же дізнатися, які властивості воно має? Сподіваємося, ви вже здогадалися: вивчати електричне поле можна за його дією на заряджені частинки або тіла.

Саме ця дія підтверджує той факт, що *електричне поле є матеріальним*, адже, по-перше, воно діє на матеріальні об'єкти (заряджену кульку, клаптик паперу, струмінь води) і, по-друге, діє незалежно від людини.

Проведемо дослід, скориставшись металевою сферою, розташованою на пластмасовій підставці. Ретельно наелектризуємо скляну паличку, потерши її об папір, і торкнемося паличкою сфери. Сфера набуде позитивного заряду (рис. 20.2). Простір навколо сфери зміниться — біля неї існуватиме електричне поле. Будемо вивчати це поле за допомогою натертої графітом повітряної кульки, зарядженої позитивно (рис. 20.3).

Дослід продемонструє, що, по-перше, *електричне поле існує в будь-якій точці простору, що оточує заряд* (заряджену сферу); по-друге, *з віддаленням від заряду поле стає слабшим*. Ми можемо також стверджувати, що *електричне поле має енергію*, адже через роботу поля кулька набуває руху, відхиляючись на деякий кут.

Ми виявили лише деякі властивості електричного поля. Детальніше про нього ви дізнаєтеся в старших класах, а поки що звернемо увагу ось на що: *електричне поле може існувати будь-де*, навіть у вакуумі.

4 Зображуємо електричне поле графічно

Коли ви хочете якнайкраще розповісти про місце, в якому побували, або про нового друга, то що ви, скоріш за все, зробите? Напевно, багато хто відповість: «Покажу фотографії».

На жаль, електричне поле сфотографувати неможливо. Англійський фізик *Майкл Фарадей* запропонував зображувати електричне поле

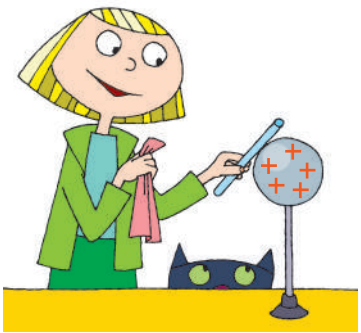


Рис. 20.2. Під час дотику до сфери позитивно зарядженої палички сфера набуває позитивного заряду

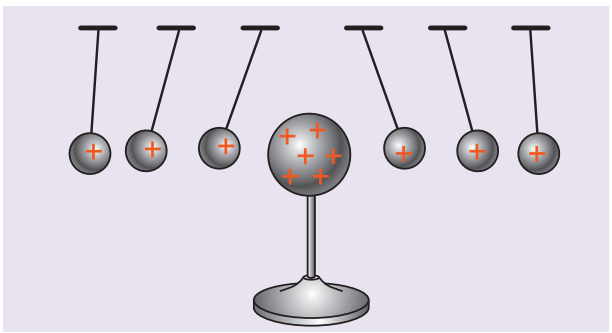


Рис. 20.3. Дослідження електричного поля зарядженої сфери: електричне поле сфери діє на заряджену кульку в будь-якій точці поблизу сфери; зі збільшенням відстані від сфери сила, що діє на кульку з боку електричного поля сфери, зменшується

графічно за допомогою *силових ліній і таким чином візуалізувати його.*

Силові лінії електричного поля, — це умовні лінії, уздовж дотичних до яких на заряджене тіло діє сила з боку електричного поля.

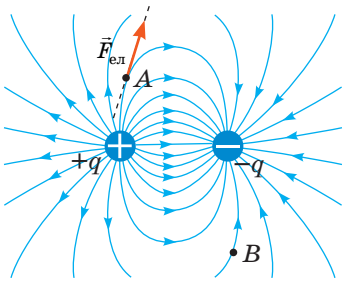


Рис. 20.4. Картина силових ліній електричного поля, створеного системою двох однакових за модулем різнойменних зарядів ($+q$ і $-q$). $\vec{F}_{ел}$ — сила, з якою це електричне поле діє на позитивний заряд, розташований у точці A

За напрямком силових ліній можна визначити *напрямок, у якому електричне поле діє на електричний заряд. Щільність силових ліній на рисунку показує, наскільки сильним є електричне поле*: чим сильніше електричне поле, тим щільніше розташовані лінії.

Розглянемо рис. 20.4, на якому графічно зображено електричне поле, створене двома різнойменними зарядами. Визначимо, куди напрямлена сила $\vec{F}_{ел}$, що діє на позитивний заряд, поміщений у точку A поля. Для цього проведемо дотичну до силової лінії в цій точці. Сила $\vec{F}_{ел}$ буде діяти вздовж цієї дотичної в напрямку силової лінії. Якщо в точку A помістити негативний заряд, то напрямок сили буде протилежним напрямку сили $\vec{F}_{ел}$.

Спробуйте визначити, куди буде напрямлена сила, що діє на негативний заряд, поміщений у точку B (див. рис. 20.4), і дізнатися, в якій точці (A чи B) електричне поле є сильнішим.

У загальному випадку лінії електричного поля є кривими, але можуть бути й прямими. Наприклад, силові лінії електричного поля рівномірно зарядженої кульки, віддаленої від інших заряджених тіл, — прямі лінії (рис. 20.5, *а, б*). Прямими є і силові лінії електричного поля між двома паралельними пластинами, які мають однакові за значенням і протилежні за знаками заряди (рис. 20.5, *в*).

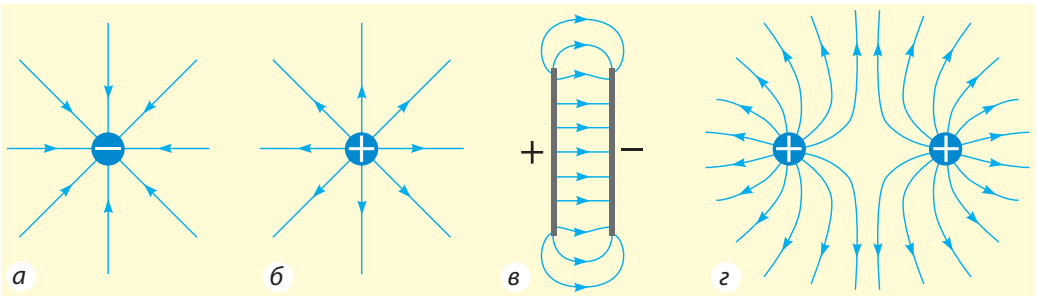


Рис. 20.5. Картини силових ліній електричних полів, створених: *а* — негативно зарядженою кулькою; *б* — позитивно зарядженою кулькою; *в* — системою двох паралельних пластин, заряди яких однакові за модулем і протилежні за знаком; *г* — системою двох кульок, що мають однакові позитивні заряди

Зверніть увагу: силові лінії електричного поля починаються на позитивному заряді й закінчуються на негативному (див., наприклад, рис. 20.4, 20.5).

5 Дізнаємося про вплив електричного поля на організм людини

Експериментально доведено, що поверхня Землі заряджена негативно, а верхні шари атмосфери — позитивно, отже, в атмосфері Землі існує електричне поле. З розвитком цивілізації це природне поле доповнилось електричними полями, створюваними різними електротехнічними пристроями, що їх використовує людина.

Сьогодні відомо, що клітини й тканини організму людини також створюють навколо себе електричні поля. Реєстрацію та вимірювання цих полів широко застосовують для діагностування різних захворювань (електроенцефалографія, електрокардіографія, електроретинографія та ін.).

Ми живемо у справжньому павутинні, зітканому з величезної кількості електричних полів. Довгий час вважалося, що вони не впливають на людей, проте зараз з'ясовано, що дія зовнішнього електричного поля на клітини й тканини організму людини, особливо тривала, призводить до негативних наслідків.

Так, під час роботи комп'ютера на екрані монітора накопичується електричний заряд, який і утворює електричне поле. Клавіатура й комп'ютерна миша також електризуються в результаті тертя. Під впливом цих електричних полів у користувача змінюються гормональний стан і біоструми мозку, що може спричинити погіршення пам'яті, підвищену стомлюваність та ін.

? Чому для здоров'я людини краще носити одяг, виготовлений з натуральних тканин, наприклад із бавовни, а не синтетичний?

Що ж робити? Адже зовсім відмовитися від роботи за комп'ютером, перегляду телевізора, використання побутової техніки, яка теж є джерелом електричних полів, досить важко. Так само нелегко зовсім відмовитися від синтетичних тканин. Розв'язати проблему можна, послабивши електричне поле, наприклад, шляхом підвищення вологості повітря або застосування антистатиків. Ефективніший, але й дорожчий спосіб — штучна йонізація повітря, насичення його легкими негативними йонами. Із цією метою застосовують *аеройонізатори* — генератори негативних йонів повітря.

Підбиваємо підсумки

Якщо в просторі виявляється дія сил на електричні заряди, то кажуть, що в просторі існує електричне поле.

Електричне поле — це особлива форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл або частинок і діє з певною силою на інші частинки або тіла, що мають електричний заряд.

Існує зручний спосіб наочного опису електричних полів, а саме їх графічне зображення за допомогою силових ліній електричного поля — умовних ліній, уздовж дотичних до яких на заряджене тіло діє сила з боку електричного поля. За напрямком силових ліній можна визначити напрямок, у якому електричне поле діє на електричний заряд.

Від впливу зовнішніх електричних полів залежать загальне самопочуття людини, функціональний стан основних систем організму.

Контрольні запитання

1. Як експериментально довести, що тіла, які мають електричний заряд, взаємодіють навіть на відстані? **2.** Що таке електричне поле? **3.** Як визначити, чи існує в певній точці простору електричне поле? **4.** Назвіть основні властивості електричного поля. **5.** Дайте означення силових ліній електричного поля. **6.** Як напрямлені силові лінії електричного поля? **7.** Який вигляд має картина силових ліній електричного поля позитивно зарядженої сфери? негативно зарядженої сфери? **8.** Який вплив на організм людини чинять електричні поля, створювані різними електротехнічними пристроями?

Вправа № 20

1. На рис. 1 зображено силові лінії електричного поля між двома парами заряджених пластин. Електричне поле між якими пластинами є більш інтенсивним? Визначте знак заряду кожної пластини.

2. На рис. 2 зображено лінії електричних полів, створених двома різними за модулем зарядами. Для кожного випадку визначте: 1) напрямок силових ліній; 2) який заряд більший за модулем; 3) напрямок сили, яка діє на позитивний заряд, розташований у точці A; 4) напрямок сили, яка діє на негативний заряд, розташований у точці B.

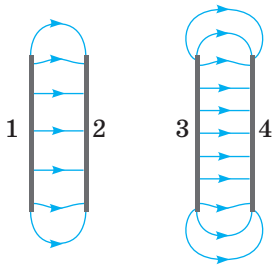


Рис. 1

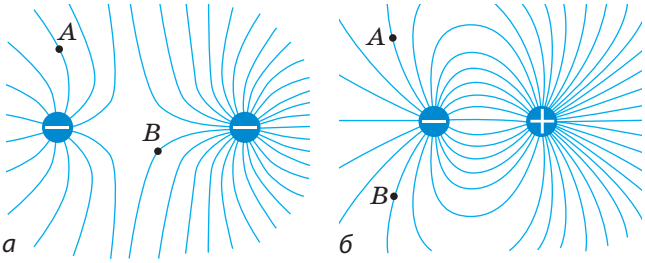


Рис. 2

3. Між двома різнойменно зарядженими пластинами зависла негативно заряджена крапелька олії масою 3,2 мг (рис. 3). Визначте напрямок і значення сили, яка діє на крапельку з боку електричного поля пластин, а також знак заряду кожної пластини.

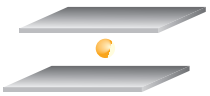


Рис. 3

4. Визначте силу натягу нитки (див. рис. 20.1, *б*), якщо електричне поле діє на кульку із силою 56 мН, об'єм кульки — 4 см^3, середня густина — 0,6 г/см^3.

5. Один із перших аеройонізаторів, який використовується й сьогодні, — люстра Чижевського. Прилад генерує негативні йони — «електричні вітаміни», як називав їх винахідник приладу *Олександр Леонідович Чижевський*. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про цей винахід і його автора.

6. Чи може частинка мати електричний заряд, що дорівнює $8 \cdot 10^{-19}$ Кл? $-2{,}4 \cdot 10^{-19}$ Кл? $2{,}4 \cdot 10^{-18}$ Кл? Поясніть свою відповідь.

Експериментальні завдання

1. Запропонуйте кілька індикаторів електричного поля, випробуйте їх.

2. «*Летюча вата*». Приготуйте розпушений шматочок вати діаметром не більш ніж 1 см і помістіть його на наелектризовану пластмасову лінійку. Різко струснувши лінійку, доможіться, щоб шматочок почав «плавати» над нею в повітрі. Поясніть спостережуване явище. Виконайте рисунок, на якому зазначте сили, що діють на вату.

§ 21. МЕХАНІЗМ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ. ЕЛЕКТРОСКОП

Рис. 21.1. Вільям Ґільберт (1544–1603) — англійський фізик і лікар, засновник науки про електрику

Вважають, що систематичне вивчення електромагнітних явищ розпочав англійський учений *Вільям Ґільберт* (рис. 21.1). Однак пояснити електризацію тіл змогли понад три століття потому. Після відкриття електрона фізики з'ясували, що певні електрони можуть порівняно легко відриватися від атома або приєднуватися до нього, перетворюючи нейтральний атом на заряджену частинку — *йон*. А от як відбувається електризація макроскопічних тіл, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

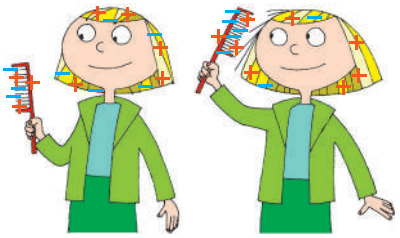
1 Розглядаємо електризацію тертям

Озброївшись знаннями про будову атома, розглянемо процес *електризації тертям*. Візьмемо ебонітову паличку і потремо її об вовняну тканину. У цьому випадку, як ви вже знаєте, паличка набуває негативного заряду. З'ясуємо, що спричинило появу заряду на паличці.

Перед натиранням і паличка, і вовна є електрично нейтральними (незарядженими). А от у разі щільного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, частина електронів переходить з одного тіла на інше. Якщо після контакту тіла роз'єднати, то вони виявляться зарядженими: *тіло, яке віддало частину своїх електронів, буде заряджене позитивно, а тіло, яке їх одержало,— негативно*. Вовна втримує свої електрони менш міцно, ніж ебоніт, тому під час контакту електрони в основному переходять з вовняної тканини на ебонітову паличку, а не навпаки. У результаті

після роз'єднання паличка виявляється негативно зарядженою, а тканина — позитивно. Аналогічного результату можна досягти, якщо розчесати сухе волосся пластмасовим гребінцем (рис. 21.2).

Зазначимо, що загальноприйнятий вираз *«електризація тертям»* є не зовсім точним, правильніше було б говорити про *електризацію через дотик*, адже тертя тіл одне об одне потрібно тільки для того, щоб збільшити кількість ділянок їх щільного контакту.



а *б*

Рис. 21.2. Перед розчісуванням кількість позитивних зарядів на волоссі й гребінці дорівнює кількості негативних (*а*). Під час розчісування частина електронів з волосся перейде на гребінець, у результаті чого гребінець зарядиться негативно, а волосся — позитивно (*б*)

2 Формулюємо закон збереження електричного заряду

Якщо перед дослідом, описаним у пункті 1 цього параграфа, паличка і вовняна тканина були не заряджені, то після контакту вони виявляться зарядженими, причому їхні заряди будуть рівні за модулем і протилежні за знаком. Тобто їхній сумарний заряд, як і перед дослідом, дорівнюватиме нулю.

У результаті численних дослідів фізики з'ясували, що *під час електризації відбувається перерозподіл наявних електричних зарядів, а не створення нових*. Отже, виконується **закон збереження електричного заряду:**

Повний заряд електрично замкненої системи тіл залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в цій системі:

$$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const},$$

де q_1, q_2, …, q_n — заряди тіл, що створюють електрично замкнену систему (n — кількість таких тіл).

Під електрично замкненою системою тіл розуміють таку систему, у яку не проникають заряджені частинки ззовні і яка не втрачає «власних» заряджених частинок.

3 Заземлюємо прилади та пристрої. Розрізняємо провідники і діелектрики

Якщо спробувати наелектризувати тертям металевий стрижень, утримуючи його в руці, то виявиться, що це неможливо. Річ у тім, що метали — це речовини з безліччю *вільних електронів*, які легко переміщуються по всьому об'єму металевого тіла. Такі речовини називають *провідниками*. Спроба наелектризувати металевий стрижень, тримаючи його в руці, приведе до того, що надлишкові електрони дуже швидко «втечуть» зі стрижня і він залишиться незарядженим. «Дорогою для втечі» електронів є сам дослідник,

Рис. 21.3. Електризація сфери через вплив (*а*); індикатором наявності заряду слугує позитивно заряджена повітряна кулька — вона відхиляється від сфери, отже, сфера (на відміну від палички) заряджена позитивно (*б*)

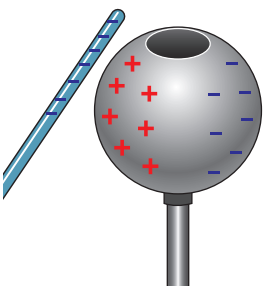


Рис. 21.4. Унаслідок дії електричного поля негативно зарядженої палички ближча до неї частина металевої сфери набуває позитивного заряду

адже тіло людини — це провідник*. Зазвичай «кінцевий пункт» для електронів — Земля, яка також є провідником. Розміри її величезні, і якщо будь-яке заряджене тіло з'єднати провідником із Землею, то воно стає практично електронейтральним (незарядженим). Адже тіла, заряджені позитивно, одержать деяку кількість електронів від землі, а з тіл, заряджених негативно, надлишкова кількість електронів піде в землю.

Технічний прийом, який дозволяє розрядити будь-яке заряджене тіло шляхом з'єднання цього тіла провідником із Землею, називають **заземленням**.

У деяких випадках, наприклад, щоб надати заряд провіднику або зберегти на ньому заряд, заземлення слід уникати. Для цього використовують тіла, виготовлені з *діелектриків*. У діелектриках (їх ще називають *ізоляторами*) вільні заряджені частинки практично відсутні. Тому якщо між землею і зарядженим тілом поставити бар'єр у вигляді ізолятора, вільні заряджені частинки не зможуть ані покинути провідник, ані потрапити на нього і провідник залишиться зарядженим.

Скло, оргскло, ебоніт, бурштин, гума, папір — діелектрики, тому в дослідах з електростатики їх легко наелектризувати — заряд з них не стікає.

4 Дізнаємося про електризацію через вплив

Проведемо дослід. Наблизимо (не торкаючись!) негативно заряджену ебонітову паличку до незарядженої металевої сфери, розташованої на ізольованій підставці. На мить торкнемося рукою до частини сфери, віддаленої від зарядженого тіла (рис. 21.3, *а*), а потім приберемо заряджену паличку. Відхилення позитивно зарядженої легкої кульки покаже, що сфера набула позитивного заряду (рис. 21.3, *б*). *Зверніть увагу:* знак заряду сфери є протилежним до знака заряду ебонітової палички.

Оскільки в цьому випадку безпосереднього контакту між зарядженим і незарядженим

* Через те що тіло людини є провідником, *досліди з електрикою можуть виявитися небезпечними для їх учасників!*

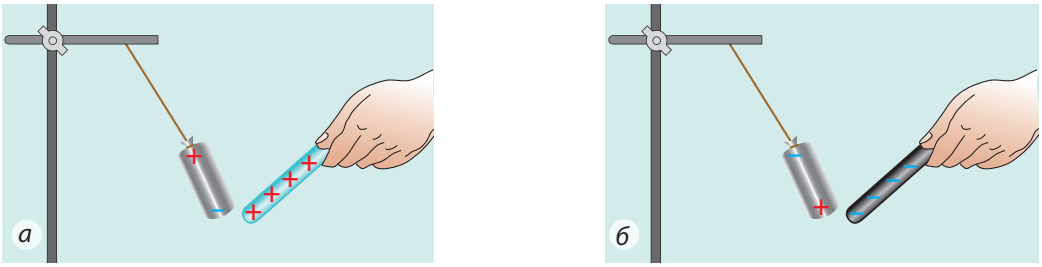


Рис. 21.5. До запитання в § 21

тілами не було, описаний процес називають **електризацією через вплив** або **електростатичною індукцією.**

Пояснюється цей вид електризації так. Унаслідок дії електричного поля негативно зарядженої палички вільні електрони перерозподіляються по поверхні металевої сфери. Електрони мають негативний заряд, тому вони відштовхуються від негативно зарядженої палички. У результаті кількість електронів стане надлишковою на віддаленій від палички частині сфери і недостатньою — на ближчій (рис. 21.4). Якщо доторкнутися до сфери рукою, то деяка кількість вільних електронів перейде зі сфери на тіло дослідника. Таким чином, на сфері виникає брак електронів, і вона стає позитивно зарядженою.

З'ясувавши механізм електризації через вплив, ви, сподіваємось, зможете пояснити, чому незаряджене металеве тіло завжди притягується до тіла, що має електричний заряд. Наприклад, поясніть, чому гільза, виготовлена з металевої фольги, притягується як до скляної палички, що має позитивний заряд (рис. 21.5, *а*), так і до ебонітової палички, заряд якої є негативним (рис. 21.5, *б*). Що відбудеться, якщо гільза торкнеться палички?

Складніше пояснити притягання до наелектризованої палички клаптиків паперу, адже відомо, що папір є діелектриком і тому практично не містить вільних електронів. Річ у тім, що електричне поле зарядженої палички діє на зв'язані електрони атомів, із яких складається папір,

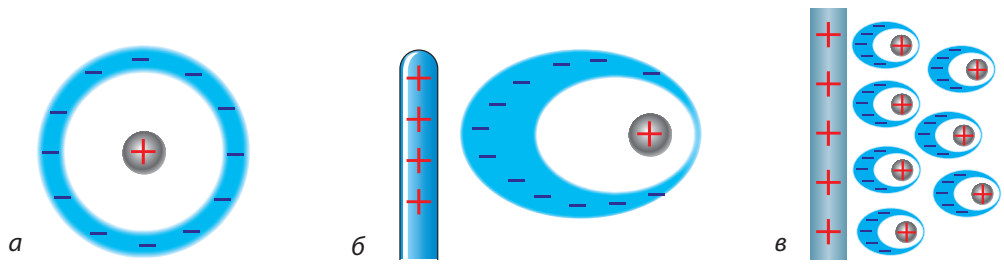


Рис. 21.6. Унаслідок дії зовнішнього електричного поля форма електронної хмари змінюється. Форма електронної хмари: за відсутності поля (*а*); за наявності поля (*б*). На поверхні паперу, ближчій до позитивно зарядженої палички, утворюється негативний заряд (*в*)

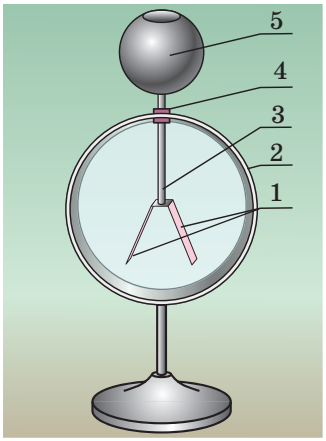


Рис. 21.7. Будова електроскопа: 1 — індикатор (паперові смужки); 2 — корпус; 3— металевий стрижень; 4 — діелектрик; 5 — кондуктор

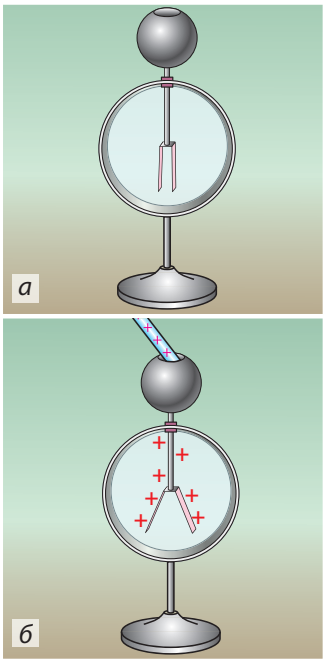


Рис. 21.8. Електроскоп незаряджений, і смужки паперу розташовані вертикально (*а*); після дотикання зарядженого тіла до кондуктора електроскопа смужки розходяться (*б*)

унаслідок чого змінюється форма електронної хмари — вона стає витягнутою (рис. 21.6). У результаті на ближчій до палички поверхні паперу утворюється заряд, який за знаком протилежний заряду палички, і тому папір починає притягуватися до палички. Описаний процес називають **поляризацією діелектрика**.

5 Конструюємо електроскоп і знайомимося з електрометром

Дотепер для вивчення електричних явищ ви використовували підручні засоби. Однак ваших знань уже достатньо, щоб зрозуміти принцип дії приладів, які дозволяють вивчати не тільки якісні, але й кількісні характеристики заряджених тіл.

Здавна для виявлення наявності в тіла електричного заряду, визначення знаку заряду тіла та оцінювання значення заряду використовують **електроскоп** (рис. 21.7). Пояснимо його будову.

Будь-які електричні явища нерозривно пов'язані з електричним полем. Ви вже знаєте, що електричне поле можна виявити за відхиленням легкої зарядженої кульки. Проте кулька — це не дуже зручний індикатор, краще використати дві смужки тонкого паперу (1). Після надання смужкам однойменного заряду вони почнуть відштовхуватися, а їхні вільні кінці (внизу) розійдуться в різні боки.

Щоб зробити прилад якомога чутливішим, для індикатора (смужок) доцільно обрати найтонший папір, але тоді на точність вимірювання можуть вплинути протяги або навіть дихання спостерігача. Для захисту смужки розташовують у корпусі (2) з прозорими бічними стінками.

Щоб донести до смужок заряд, використовують провідник — металевий стрижень (3). Щоб електричний заряд не стікав зі стрижня на корпус, у місці їхнього стикання встановлюють бар'єр із діелектрика (4).

Нарешті, останній елемент конструкції електроскопа — кондуктор (5) — металева порожниста куля, яка прикріплена до верхнього кінця стрижня.

Якщо до кондуктора електроскопа доторкнутися досліджуваним зарядженим тілом, то частина заряду цього тіла потрапить на

паперові смужки і вони розійдуться (рис. 21.8). *Зверніть увагу:* кут між смужками залежить від значення одержаного ними заряду. Цей кут тим більший, чим більший одержаний заряд.

Для виявлення й оцінювання електричного заряду застосовують також **електрометр** (рис. 21.9). На відміну від електроскопа, електрометр обов'язково має металевий корпус, шкалу, завдяки якій можна точніше оцінити значення переданого на електрометр заряду, та легку металеву стрілку (замість паперових смужок).

Рис. 21.9. Електрометр

Підбиваємо підсумки

Якщо електронейтральне тіло (тобто таке, що не має заряду) віддає частину своїх електронів, то воно стає зарядженим позитивно, а якщо одержує електрони, то стає зарядженим негативно.

Під час електризації тіл відбувається перерозподіл наявних у них електричних зарядів, а не створення нових. Для ізольованої системи тіл виконується закон збереження електричного заряду: повний заряд електрично замкненої системи тіл залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в системі.

Технічний прийом, який дозволяє розрядити будь-яке заряджене тіло шляхом з'єднання цього тіла провідником із Землею, називають заземленням.

Під час дії електричного поля на провідник відбувається процес перерозподілу електричних зарядів усередині провідника — електростатична індукція. Під час дії електричного поля на діелектрик відбувається поляризація діелектрика.

Електроскоп — прилад для виявлення електричного заряду.

Контрольні запитання

1. Що і чому відбувається під час щільного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів? **2.** Чому під час тертя ебонітової палички об вовняну тканину електризуються обидва тіла? **3.** Сформулюйте закон збереження електричного заряду. **4.** У чому полягає відмінність провідників і діелектриків? **5.** Що називають заземленням? **6.** Як за допомогою негативно зарядженого тіла зарядити інше тіло позитивно? **7.** Поясніть, чому будь-яке електрично ізольоване незаряджене тіло завжди притягується до тіла, яке має електричний заряд. **8.** Для чого застосовують електроскоп? Як він сконструйований і яким є принцип його дії? **9.** Чим електрометр відрізняється від електроскопа?

Вправа № 21

1. Чи відрізняється маса незарядженої палички з оргскла від маси тієї самої палички, зарядженої позитивно? Якщо відрізняється, то як?

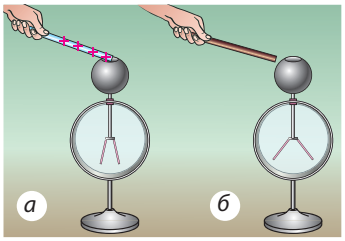


Рис. 1

2. Чи може статися так, що після дотику до кондуктора зарядженого електроскопа якимось тілом електроскоп виявиться незарядженим? Поясніть свою відповідь.
3. Електроскопу передали позитивний заряд (рис. 1, *а*). Потім до нього піднесли не торкаючись іншу заряджену паличку (рис. 1, *б*). Визначте знак заряду палички.
4. Дві однакові провідні заряджені кульки торкнулися одна одної й відразу розійшлися. Обчисліть заряд кожної кульки після дотику, якщо перед дотиком заряд першої кульки дорівнював $-3 \cdot 10^{-9}$ Кл, заряд другої кульки дорівнював $9 \cdot 10^{-9}$ Кл.
5. Як за допомогою негативно зарядженої металевої кульки, не зменшуючи її заряду, позитивно зарядити таку саму, але незаряджену кульку? негативно зарядити таку саму кульку?
6. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся, для чого використовують антистатик і як він «працює».

Експериментальні завдання

Рис. 2

1. Зі скляної банки з капроновою кришкою виготовте електроскоп (рис. 2). Як стрижень електроскопа можна використати металеву спицю для плетіння, а замість смужок паперу — вузькі смужки фольги. Випробуйте виготовлений вами електроскоп.
2. Виготовте з легкого паперу маленькі човники та опустіть їх на воду. За допомогою наелектризованого гребінця змусьте вашу «флотилію» рухатися.

Фізика і техніка в Україні

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ) — найбільший вищий навчальний заклад країни — було створено наприкінці XIX ст. Тоді на чотирьох відділеннях інституту навчалося лише 360 студентів. Сьогодні КПІ, якому в 1995 р. надано статус Національного технічного, а в 2007 р. — статус дослідницького університету, налічує понад 40 тис. студентів, що здобувають знання на 19 факультетах. Протягом XX ст. з інститутом були тісно пов'язані життя та діяльність усесвітньо відомих учених й інженерів: *Д. І. Менделєєва, М. Є. Жуковського, К. А. Тімірязєва, І. І. Сікорського, С. П. Корольова, С. П. Тимошенка, Є. О. Патона, Б. Є. Патона* та багатьох інших.

§ 22. ЗАКОН КУЛОНА

До кінця XVIII ст. електричні явища вивчалися тільки якісно, а електричні машини переважно виконували роль іграшок для розваг аристократії. Перехід до кількісних характеристик, а потім і до практичного застосування електрики став можливим тільки після того, як французький дослідник *Шарль Кулон* (рис. 22.1) у 1785 р. встановив *закон взаємодії точкових зарядів*. Від того часу вчення про електрику перетворилося на точну науку.

1 Вводимо поняття точкового заряду

До того як вивчати закон взаємодії точкових зарядів, слід розібратися з терміном «*точковий заряд*». Скористаємося аналогією з механікою, адже поняття «точковий заряд» подібне до поняття «матеріальна точка». Згадайте торішній курс фізики. Наприклад, потяг «Київ — Львів» можна розглядати як матеріальну точку, якщо будувати графік його руху на маршруті між двома містами. А от мураху не можна розглядати як матеріальну точку, якщо, припустимо, розв'язувати задачу про траєкторію руху її передньої лапки.

Рис. 22.1. Шарль Оґюстен Кулон (1736–1806) — французький фізик і військовий інженер. У 1785 р. сформулював основний закон електростатики, пізніше названий його ім'ям

За аналогією з матеріальною точкою *точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.*

Точковий заряд, так само як і матеріальна точка, є не реальним об'єктом, а фізичною моделлю. Необхідність введення такої моделі спричинена тим, що в загальному випадку взаємодія заряджених тіл залежить від багатьох чинників, отже, не існує єдиної простої формули, яка описує електричну взаємодію для будь-якого довільного випадку.

2 Установлюємо, від чого залежить сила взаємодії двох точкових зарядів

Військовий інженер Ш. Кулон почав проводити свої дослідження в галузі, вельми далекій від електростатики. Він виявляв закономірності пружного крутіння ниток і встановив залежність сили пружності від кута закручування. Отримані дані дозволили Кулону сконструювати надзвичайно чутливий прилад, який він назвав *крутильними терезами* (рис. 22.2). Пізніше вчений використав крутильні терези для вимірювання сили взаємодії точкових зарядів.

У своїх дослідах Кулон спостерігав взаємодію невеликих провідних заряджених кульок. Умови дослідів дозволяли вважати ці кульки точковими зарядами. Досліди вчений проводив так.

У скляний циліндр на спеціальному тримачі було поміщено заряджену кульку 1 (див. рис. 22.2). Обертаючи кришку циліндра, дослідник домагався, щоб кульки 1 і 2 доторкнулись одна до одної і частина заряду з кульки 1 перейшла на кульку 2. Однойменні заряди відштовхуються, тому кулька 2 відходила на деяку відстань. За кутом закручування дроту Кулон визначав силу взаємодії зарядів.

Потім, обертаючи кришку циліндра, дослідник змінював відстань між кульками та кожного разу вимірював силу їх відштовхування. Виявилося: коли відстань збільшувалась у два, три, чотири рази, сила взаємодії кульок зменшувалася відповідно в чотири, дев'ять і шістнадцять разів.

Провівши чимало подібних дослідів, Кулон зробив висновок, що *сила F взаємодії двох точкових зарядів обернено пропорційна квадрату відстані r між ними:*

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

Для виявлення залежності сили F від зарядів кульок Кулон застосував такий прийом. Спочатку вчений вимірював силу взаємодії двох кульок — 1 і 2, які мали однаковий заряд q ($q_1 = q$; $q_2 = q$).

Потім дослідник торкався кульки 1 незарядженою кулькою 3. Розміри кульок були однаковими, тому заряд розподілявся між кульками порівну, тобто на кульці 1 залишався заряд $\frac{q}{2}$. Після цього Кулон вимірював силу взаємодії зарядженої кульки 1 $\left(q_1 = \frac{q}{2}\right)$ і зарядженої кульки 2 ($q_2 = q$).

Продовжуючи ділити заряди кульок і здійснюючи вимірювання, учений переконався, що *сила F взаємодії двох точкових зарядів q_1 і q_2 прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів*:

$$F \sim |q_1| \cdot |q_2|$$

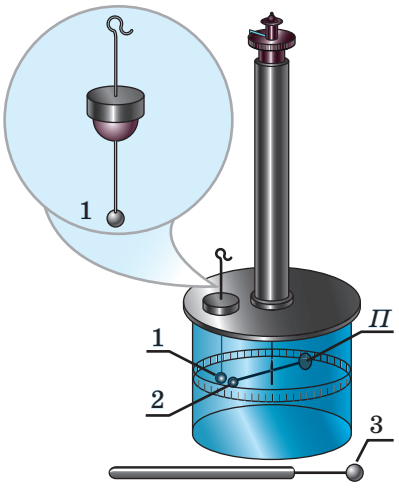


Рис. 22.2. Крутильні терези Кулона. На металевому дроті закріплене коромисло, на кінцях якого розміщені кулька 2 і противага *П*. Крізь отвір у кришці скляного циліндра опускають кульку 1. Кулька 3 розташована на тримачі, який виготовлений із діелектрика

3 Формулюємо закон Кулона

На підставі проведених дослідів Кулон установив закон, який згодом отримав його ім'я, — **закон Кулона**:

> Сила F взаємодії двох нерухомих точкових зарядів q_1 і q_2 прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними:

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

де k — коефіцієнт пропорційності.

Було встановлено, що під час взаємодії точкових зарядів у вакуумі* $k = 9\cdot10^9 \ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

Зверніть увагу: в законі Кулона йдеться про добуток модулів зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили.

Сили, з якими взаємодіють два точкові заряди, ще називають **силами Кулона**.

Сили Кулона напрямлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють (рис. 22.3).

Знаючи значення коефіцієнта k, можна оцінити силу, з якою два заряди по 1 Кл кожний взаємодіють на відстані 1 м. Це дуже велика сила! Вона дорівнює, наприклад, силі тяжіння, що діє на велике судно (рис. 22.4).

? Скориставшись законом Кулона, обчисліть значення цієї сили.

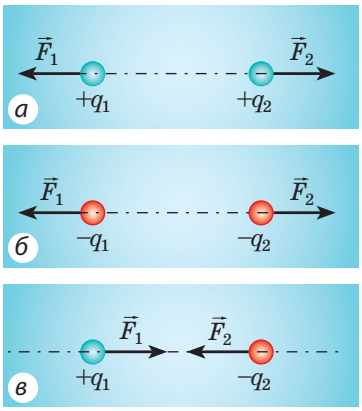


Рис. 22.3. Сили електричної взаємодії ($\vec{F}_1$ і $\vec{F}_2$) напрямлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Дві невеликі негативно заряджені кульки розташовані в повітрі на відстані 30 см одна від одної. Сила їх взаємодії становить 32 мкН. Обчисліть кількість надлишкових електронів на другій кульці, якщо заряд першої кульки дорівнює −40 нКл.

Аналіз фізичної проблеми. Щоб визначити кількість надлишкових електронів,

Рис. 22.4. Якби на днищі судна й на відстані 1 м під його днищем можна було розмістити однойменні заряди по 1 Кл кожний, то вдалося б перебороти силу земного тяжіння й без жодних спеціальних пристроїв підняти судно

* У багатьох середовищах сила взаємодії буде значно меншою, ніж у вакуумі. У повітрі порівняно з вакуумом вона зменшується незначно.

згадаємо, що електричний заряд є дискретним: $|q| = N|e|$, де N — кількість надлишкових електронів, а $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд електрона.

Кульки невеликі й розташовані на значній відстані одна від одної, тому їх можна вважати точковими зарядами і для визначення заряду q_2 скористатися законом Кулона.

Дано:

$r = 0{,}3$ м

$F = 32 \cdot 10^{-6}$ Н

$q_1 = -40 \cdot 10^{-9}$ Кл

$e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$k = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$

Знайти:

N_2 — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За законом Кулона $F = \dfrac{k|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$.

Отже, $Fr^2 = k|q_1| \cdot |q_2| \Rightarrow |q_2| = \dfrac{Fr^2}{k|q_1|}$.

Але $|q_2| = N_2|e|$, тому $N_2|e| = \dfrac{Fr^2}{k|q_1|}$. Звідси маємо:

$$N_2 = \frac{Fr^2}{k|q_1| \cdot |e|}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N_2] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \text{Кл} \cdot \text{Кл}} = 1$$ (кількість електронів — безрозмірнісна величина);

$$N_2 = \frac{32 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}09}{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = \frac{32 \cdot 9 \cdot 10^{-8}}{9 \cdot 4 \cdot 16 \cdot 10^{-19}} = 5 \cdot 10^{10}.$$

Відповідь: $N_2 = 5 \cdot 10^{10}$.

Підбиваємо підсумки

Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

Закон взаємодії нерухомих точкових зарядів був установлений Ш. Кулоном за допомогою крутильних терезів.

Закон Кулона: сила F взаємодії двох нерухомих точкових зарядів q_1 і q_2 прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними: $F = k\dfrac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$. Сили Кулона напрямлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють.

Контрольні запитання

1. Який заряд називають точковим? Порівняйте поняття «точковий заряд» і «матеріальна точка». **2.** Опишіть прийом, який застосував Ш. Кулон, щоб з'ясувати залежність сили взаємодії двох точкових зарядів від модулів цих зарядів. **3.** Сформулюйте закон Кулона. **4.** Чому, формулюючи закон Кулона, слід обов'язково користуватися поняттям «точковий заряд»? **5.** За якою формулою визначається сила Кулона? **6.** Як напрямлена сила Кулона?

Вправа № 22

1. На рис. 1 зображено дві пари нерухомих невеликих кульок. Зобразіть силу Кулона, що діє на кожну кульку.
2. Як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо модуль кожного з них збільшити у 2 рази?
3. Як змінилася відстань між двома точковими зарядами, якщо відомо, що сила їхньої взаємодії зменшилася в 9 разів?

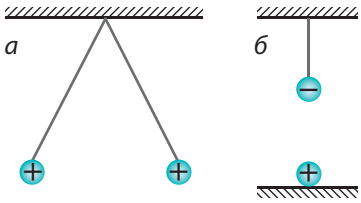


Рис. 1

4. Дві кульки розташовані на відстані 16 см одна від одної. Визначте силу взаємодії кульок, якщо відомо, що на кожній із них є $2 \cdot 10^{10}$ надлишкових електронів. Вважайте кульки точковими зарядами.
5. Дві однакові провідні кульки із зарядами −5 нКл і +15 нКл торкнулись одна одної та розійшлись на відстань 60 см. Визначте силу взаємодії кульок. Вважайте кульки точковими зарядами.
6. На рис. 2 зображено три пари провідних кульок, які розташовані на однаковій відстані одна від одної. Модулі зарядів усіх кульок є однаковими. Чи з однаковою силою взаємодіють пари кульок? Якщо ні, то яка пара кульок взаємодіє сильніше?

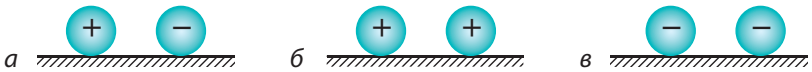


Рис. 2

7. Установіть відповідність між властивістю, що лежить в основі дії пристрою, та назвою цього пристрою.

1 Нагрітий газ, розширюючись, виконує роботу.	**А** Мензурка
2 Однойменні заряди відштовхуються.	**Б** Тепловий двигун
3 Усі тіла притягуються до Землі.	**В** Терези
4 Рідина зберігає об'єм.	**Г** Біметалева пластинка
	Д Електроскоп

§ 23. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Напевне, багато школярів на запитання «Що б ви взяли із собою на безлюдний острів?» швидко дадуть відповідь: «Мобільний телефон і комп'ютер», — проте через деякий час, звичайно, збагнуть: «Ой, там же немає електрики!..»

Важко уявити, але ще сто років тому більша частина нашої країни була подібна до такого острова: електрикою могли скористатися лише деякі люди. Сьогодні ж кожен назве не менш ніж десять електричних побутових приладів, без яких нам уже складно уявити своє життя: пральна машина, лампа, телевізор тощо. Ці прилади називають електричними, адже їхня робота заснована на дії електричного струму. А що таке електричний струм?

1 Даємо означення електричного струму

Проведемо дослід. Поставимо на столі два електрометри (*А* і *Б*) і зарядимо один із них, наприклад електрометр *А* (рис. 23.1, *а*). З'єднаємо кондуктори електрометрів металевим стрижнем, закріпленим на пластмасовій ручці. За відхиленням стрілок електрометрів видно, що заряд електрометра *А* зменшився, а незаряджений електрометр *Б* отримав заряд (рис. 23.1, *б*). Це означає, що певна кількість заряджених частинок (у цьому випадку електронів) перейшла стрижнем від одного приладу до іншого. Кажуть, що у стрижні існував *електричний струм*.

Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок.

2 З'ясовуємо умови виникнення та існування електричного струму

З огляду на означення електричного струму сформулюємо першу умову для його виникнення та існування в середовищі: *у середовищі повинні бути заряджені частинки, які можуть вільно переміщатися*. Такі частинки ще називають *носіями струму*.

Однак цієї умови недостатньо для того, щоб у середовищі існував електричний струм. Для створення та підтримування напрямленого руху вільних заряджених частинок необхідна також *наявність електричного поля*. Саме завдяки дії електричного поля рух заряджених частинок набуде впорядкованого (напрямленого) характеру, що й означатиме появу в даному середовищі електричного струму.

3 Учимося розрізняти провідники, діелектрики та напівпровідники

Знаючи умови виникнення та існування електричного струму, неважко здогадатися, що *електрична провідність* — здатність проводити електричний струм — у різних речовин є різною. Залежно від цієї здатності всі речовини й матеріали поділяють на *провідники*, *діелектрики* та *напівпровідники* (про провідники та діелектрики вже йшлося в § 21).

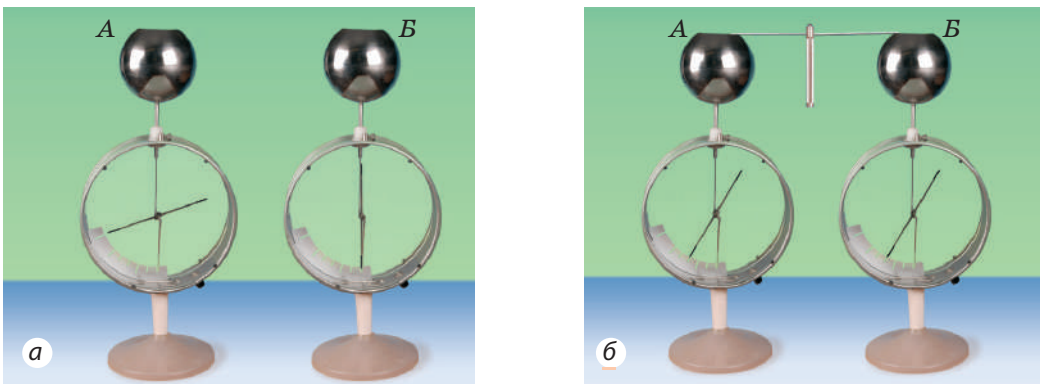


Рис. 23.1. Якщо заряджений електрометр з'єднати з незарядженим за допомогою провідника, частина заряду перейде на незаряджений електрометр

Провідники — речовини та матеріали, які добре проводять електричний струм.

Провідниками є метали (як у твердому, так і в рідкому станах), графіт, водні розчини солей (наприклад, кухонної солі), кислот і лугів. Висока електрична провідність провідників пояснюється наявністю в них великої кількості вільних заряджених частинок. Так, у металевому провіднику частина електронів, залишивши атоми, вільно «мандрує» по всьому його об'єму, і кількість таких електронів сягає 10^{23} в кубічному сантиметрі.

Волога земля, тіло людини або тварини добре проводять електричний струм, бо містять речовини, що є провідниками.

Діелектрики — речовини та матеріали, які погано проводять електричний струм.

Діелектриками є багато твердих речовин (ебоніт, порцеляна, гума, скло та ін.), рідин (дистильована вода, гас, спирт, бензин та ін.), газів (кисень, водень, азот, вуглекислий газ та ін.). У діелектриках майже відсутні вільні заряджені частинки.

Провідники й діелектрики широко застосовують у промисловості, побуті, техніці. Так, проводи, якими підводять електричний струм від електростанцій до споживачів, виготовляють із металів — чудових провідників. При цьому на опорах проводи розташовують на ізоляторах, — це запобігає стіканню електричного заряду в землю (рис. 23.2).

Як ви вважаєте, чому проводи, які прокладають у землі, вкривають шаром діелектрика?

Існує багато речовин (наприклад, германій, кремній, арсен), які називають **напівпровідниками**. Зазвичай вони погано проводять електричний струм і їх можна віднести до діелектриків. Однак якщо підвищити температуру або збільшити освітленість, або додати домішки, у напівпровідниках з'являється достатня кількість вільних заряджених частинок і напівпровідники стають провідниками. Напівпровідники використовують для виготовлення радіоелектронної апаратури, сонячних батарей (рис. 23.3) тощо.

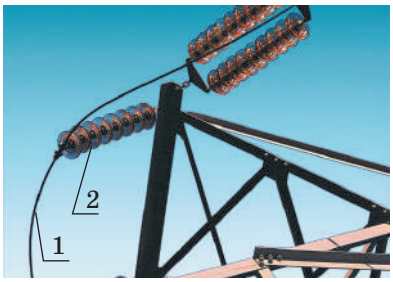


Рис. 23.2. Створення ліній електропередачі неможливе без використання провідників (1) і діелектриків (2)

Рис. 23.3. Напівпровідникові кристали використовують для виготовлення сонячних батарей

Підбиваємо підсумки

Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок. Для виникнення й існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок та електричного поля, дія якого створює й підтримує їхній напрямлений рух.

Залежно від електричної провідності всі речовини умовно поділяють на провідники (речовини, які добре проводять електричний струм), діелектрики (речовини, які погано проводять електричний струм) і напівпровідники.

Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм? **2.** Сформулюйте умови виникнення та існування електричного струму. **3.** Які речовини відносять до провідників, діелектриків, напівпровідників? Наведіть приклади. **4.** Чому метали добре проводять електричний струм? **5.** Наведіть приклади використання провідників і діелектриків.

Вправа № 23

1. Запишіть назви кількох предметів, виготовлених із речовин, які є: а) провідниками; б) діелектриками.

2. Яким вимогам має відповідати матеріал для виготовлення корпусів розеток і вимикачів?

3. Чому важко, а іноді практично неможливо зарядити електроскоп у приміщенні з високою вологістю повітря?

4. Чому в досліді, описаному в пункті 1 § 23, кондуктори електрометрів з'єднували металевим стрижнем (див. рис. 23.1)? Для чого стрижень був закріплений на пластмасовій ручці? Як зміняться результати досліду, якщо замість металевого стрижня скористатися пластмасовим?

5. Чи рухаються вільні заряджені частинки в провіднику, коли в ньому немає струму? Поясніть свою відповідь.

6. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, які речовини є найкращими діелектриками і де їх застосовують.

7. До двох з'єднаних металевих пластин *А* і *Б* піднесли наелектризовану об вовну ебонітову паличку (див. рисунок).

1) Якого заряду набуде пластина *А*? пластина *Б*?

2) Чи залишаться пластини зарядженими, якщо:

а) роз'єднати пластини, не прибираючи палички?

б) прибрати паличку, а потім роз'єднати пластини?

А *Б*

§ 24. ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Ви вже знаєте, що електричним струмом називають процес напрямленого руху частинок, які мають електричний заряд. Але як з'ясувати, чи тече в провіднику електричний струм? Адже побачити, наприклад, як у металевому стрижні рухаються вільні електрони, неможливо. Відомо, що про наявність електричного струму ми дізнаємося завдяки його діям. Саме про різні дії електричного струму йтиметься в цьому параграфі.

1 Дізнаємося про теплову та світлову дії електричного струму

Теплова дія електричного струму виявляється в нагріванні провідника, в якому тече струм. Так, коли ви прасуєте, припаюєте деталь електричним паяльником, готуєте на електричній плиті або користуєтеся електрочайником, обігріваєте кімнату електричним нагрівником, то використовуєте побутові прилади, функціонування яких ґрунтується на тепловій дії електричного струму (рис. 24.1).

Теплову дію електричного струму широко використовують також у промисловості (зварювання, різання, плавлення металів) і сільському господарстві (обігрів теплиць та інкубаторів, сушіння зерна, сінажу).

Прояв теплової дії струму можна спостерігати й у природі: енергія, що виділяється під час блискавки, може спричинити лісову пожежу (рис. 24.2).

? Пожежа внаслідок удару блискавки є прикладом, коли теплова дія струму виявляється шкідливою. Спробуйте навести інші приклади шкідливої теплової дії струму.

Якщо в коло ввімкнути лампу розжарення, її нитка нагрівається і почне випромінювати світло. У цьому випадку водночас із тепловою дією ми спостерігаємо *світлову дію електричного струму*. До речі, в лампі

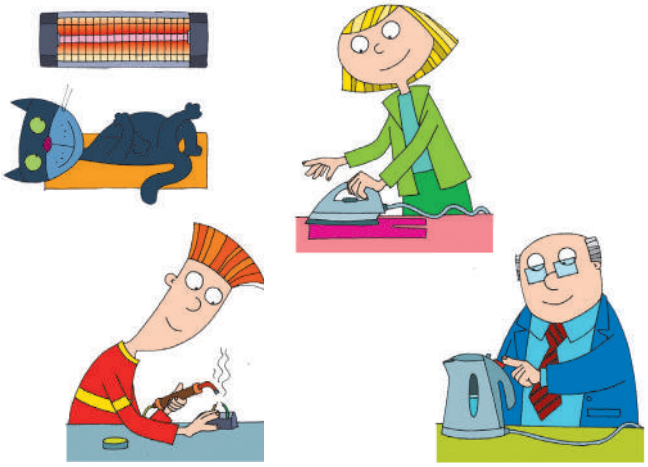


Рис. 24.1. Функціонування багатьох побутових пристроїв ґрунтується на тепловій дії електричного струму

Рис. 24.2. Досить часто лісові пожежі спричиняються блискавкою

Рис. 24.3. Електричні лампи — пристрої, в яких електрична енергія частково перетворюється на енергію світла: *а* — лампа розжарення (ККД — 5 %); *б* — люмінесцентна лампа (ККД — 10–20 %); *в* — світлодіодна лампа (ККД — 50 %)

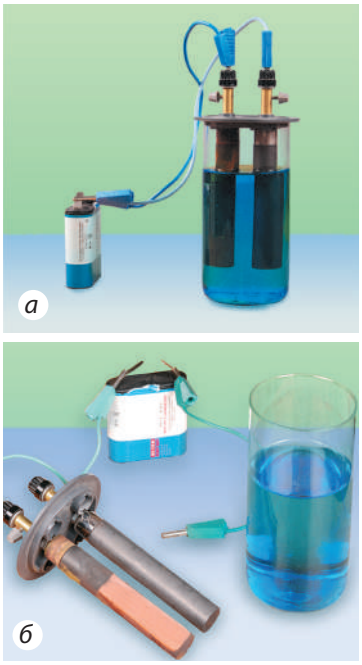


Рис. 24.4. Дослід, який демонструє хімічну дію електричного струму: якщо протягом деякого часу пропускати струм через водний розчин сульфату міді (*а*), на одному з електродів з'явиться тонкий шар міді (*б*)

розжарення на світло перетворюється лише 5 % електричної енергії (рис. 24.3, *а*). Останнім часом широко застосовують *енергозберігальні лампи* — в них на світло перетворюється до 50 % електричної енергії (рис. 24.3, *б*, *в*).

Наведіть приклади світлової дії струму в природі.

2 Спостерігаємо хімічну дію електричного струму

Коли через розчини солей, кислот, лугів проходить струм, то на електродах, занурених у розчин, відбуваються хімічні реакції. У такому випадку ми маємо справу з *хімічною дією електричного струму*.

Так, якщо в посудину з водним розчином сульфату міді ($CuSO_4$) опустити два вугільні електроди й пропустити крізь розчин електричний струм (рис. 24.4, *а*), через деякий час один з електродів вкриється тонким шаром чистої міді (рис. 24.4, *б*).

Наприкінці цього розділу ви ознайомитеся з різними випадками хімічного розкладення речовин унаслідок дії електричного струму, а також дізнаєтеся про застосування цього явища.

Слід зазначити, що *хімічна дія струму виявляється не завжди*. Пропустивши струм, наприклад, через метали, ми не виявимо жодних хімічних змін.

3 Знайомимося з магнітною дією електричного струму

Провідник, у якому тече електричний струм, набуває магнітних властивостей. Переконатися в цьому можна за допомогою звичайного залізного цвяха. Намотаємо на цвях ізольований провід і пропустимо по проводу струм. Цвях почне притягувати до себе залізні предмети, тобто виявить *магнітні властивості* (рис. 24.5).

Робота різноманітних електродвигунів, електровимірювальних приладів можлива тільки завдяки *магнітній дії електричного струму* (рис. 24.6). Докладніше про магнітну

дію струму ви дізнаєтесь у 9 класі, вивчаючи магнітні явища.

Розглядаючи різні дії електричного струму, слід звернути увагу на те, що найчастіше кілька дій виявляються одночасно. Наприклад, під час досліду щодо спостереження хімічної дії струму (див. рис. 24.4) температура розчину сульфату міді поступово збільшується, а якщо біля посудини помістити магнітну стрілку, вона відхилиться.

Рис. 24.5. Під час пропускання струму цвях стає магнітом і притягує до себе залізні ошурки

4 Дізнаємося про дію електричного струму на організми

Електричний струм чинить теплову, хімічну, магнітну дії на живі організми, в тому числі на людину. Напевно, деякі з вас відвідували в поліклініці кабінет фізіотерапії. Багато приладів, що є в цьому кабінеті, призначені для *електролікування*: теплову дію електричного струму використовують для прогрівання частин тіла, хімічну й магнітну — для стимулювання діяльності органів, поліпшення обміну речовин тощо.

Слід, однак, пам'ятати, що далеко не завжди електричний струм діє на організм людини цілюще. Струм може викликати опік, судоми й навіть спричинити смерть. Тому перед тим, як користуватися будь-яким електроприладом чи пристроєм, слід уважно вивчити інструкцію до нього та неухильно її дотримуватися.

Рис. 24.6. Робота більшості електровимірювальних приладів і електричних двигунів ґрунтується на магнітній дії струму

Підбиваємо підсумки

Під час проходження в провіднику електричний струм чинить теплову дію (нагрівання провідника), магнітну дію (відхилення магнітної стрілки, намагнічування заліза), може чинити хімічну дію (хімічне розкладення речовин) і світлову дію (світіння лампи). Дуже часто різні дії електричного струму виявляються одночасно.

Електричний струм чинить теплову, хімічну та магнітну дії на живі організми, в тому числі на людину.

Контрольні запитання

1. Як дізнатися, чи проходить у провіднику струм? **2.** Перелічіть дії електричного струму. **3.** Доведіть, що електричний струм чинить теплову дію; може чинити світлову дію. **4.** Опишіть дослід, який підтверджує, що електричний струм чинить хімічну дію. **5.** Чи завжди виявляється хімічна дія струму? **6.** Що слід зробити, щоб намагнітити залізний цвях? **7.** Наведіть приклади на підтвердження того, що електричний струм діє на організм людини. Як ця дія виявляється? Де її використовують?

Вправа № 24

1. Наведіть не згадані в § 24 приклади побутових технічних пристроїв, робота яких ґрунтується на тепловій дії струму.

2. Чому користування електричними приладами та пристроями вимагає особливої обережності?

3. Чому спалах блискавки супроводжується громом?

4. Деякі риби, наприклад електричний скат і електричний вугор, використовують дію електричного струму для захисту, полювання, орієнтації в просторі. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про таких риб більше.

5. Електрообігрівач, який працює в кімнаті, виділяє протягом доби 81 МДж теплоти. Скільки дров потрібно спалити в каміні, щоб передати кімнаті ту саму кількість теплоти? ККД каміна — 45 %.

§ 25. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Багатьом знайома ситуація: необхідно терміново зателефонувати, ви берете мобільний телефон і з прикрістю виявляєте, що батарея акумуляторів розрядилась, а телефон із дива технічної думки перетворився на шматок пластику. Те саме може статись і з акумуляторами фотоапарата, плеєра, ліхтарика, годинника. Що робити далі, знає навіть першокласник, а от що таке акумулятор, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 Знайомимося з джерелами електричного струму

Зрозуміло, що будь-який справний електротехнічний пристрій працюватиме тільки тоді, коли виконані умови існування електричного струму: наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля. За створення електричного поля «відповідають» *джерела струму*.

У джерелах електричного струму електричне поле створюється й підтримується завдяки розділенню різнойменних електричних зарядів.

У результаті на одному полюсі джерела накопичуються частинки, що мають позитивний заряд, а на другому — частинки, що мають негативний заряд. Між полюсами виникає електричне поле.

Однак розділити різнойменні заряди не так просто, адже між ними існують сили притягання. Для розділення різнойменних зарядів, а отже, для створення електричного поля необхідно виконати роботу. І виконати її можна за рахунок механічної, хімічної, теплової та інших видів енергії.

Джерела електричного струму — пристрої, які перетворюють різні види енергії на електричну енергію.

2 Дізнаємося про різні види джерел електричного струму

Усі джерела електричного струму можна умовно розділити на фізичні і хімічні.

До *фізичних джерел електричного струму* прийнято відносити пристрої, в яких розділення зарядів відбувається за рахунок механічної, світлової або теплової енергії. Прикладами таких джерел струму можуть бути електрофорна машина (рис. 25.1), турбогенератори електростанцій (рис. 25.2), фото- і термоелементи (рис. 25.3, 25.4) тощо.

Який вид енергії перетворюється на електричну енергію в динамогенераторі велосипеда? у вітровому генераторі?

Хімічними джерелами електричного струму називають пристрої, в яких розподіл зарядів відбувається за рахунок енергії, що виділяється внаслідок хімічних реакцій. До хімічних джерел струму належать *гальванічні елементи* й *акумулятори*.

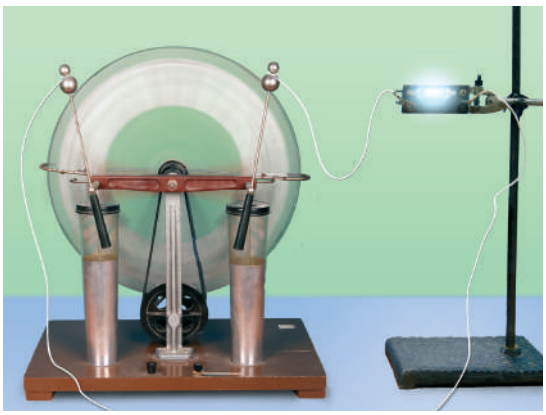


Рис. 25.1. Якщо різнойменно заряджені кондуктори електрофорної машини з'єднати з електричною лампою, в лампі виникне електричний струм. Лампа світитиметься, поки обертаються диски машини, — в цьому випадку механічна енергія перетворюється на електричну

Рис. 25.2. Завдяки турбогенераторам, що перетворюють механічну енергію обертання турбін на енергію електричного струму, виробляють 80% споживаної у світі електроенергії

Рис. 25.3. Сонячні батареї супутника дистанційного зондування Землі постачають електроенергію для всієї дослідницької апаратури. Сонячні батареї перетворюють енергію світла на електричну енергію

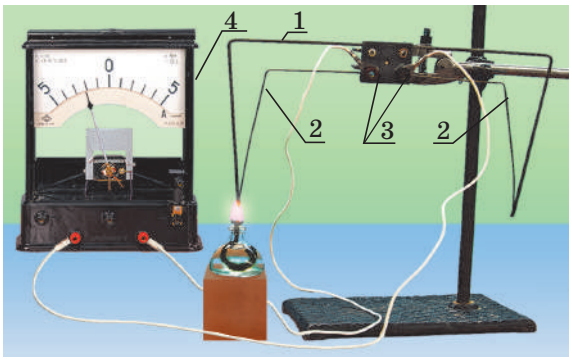


Рис. 25.4. Термопара — пристрій для перетворення теплової енергії на електричну. До кінців константанового дроту (1) припаяно два залізні дроти (2), вільні кінці яких (3) з'єднані з гальванометром* (4). Якщо нагріти місце спаю, гальванометр зафіксує наявність струму

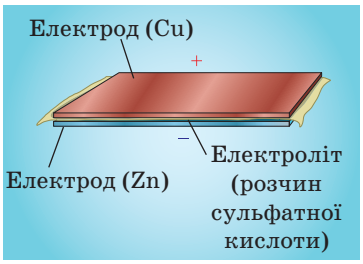


Рис. 25.5. Найпростіший гальванічний елемент

Рис. 25.6. Алессандро Во́льта (1745–1827) — італійський фізик, винахідник батареї гальванічних елементів («вольтів стовп»)

3 Створюємо гальванічний елемент

Візьмемо мідну й цинкову пластинки та очистимо їхні поверхні. Між пластинками покладемо тканину, змочену в слабкому розчині сульфатної кислоти. Виготовлений пристрій являє собою найпростіший *гальванічний елемент* (рис. 25.5). Якщо з'єднати пластинки через *гальванометр**, то прилад зафіксує наявність струму.

Гальванічний елемент створив італійський учений *А. Во́льта* (рис. 25.6); він назвав його на честь свого співвітчизника — анатома і фізіолога *Луїджі Ґальва́ні* (1737–1798). Досліди, описані Ґальвані, підказали А. Вольті ідею створення хімічного джерела струму.

Будь-який гальванічний елемент складається з *двох електродів* та *електроліту*.

Між електродами й електролітом відбуваються хімічні реакції, в результаті яких один із електродів набуває позитивного заряду, а інший електрод — негативного заряду. Коли запас речовин, що беруть участь у реакціях, виснажується, гальванічний елемент припиняє роботу.

* *Гальванометр* — чутливий електровимірювальний прилад, який часто використовують як індикатор наявності слабкого електричного струму.

4 Вивчаємо акумулятори

Із часом гальванічні елементи стають непридатними до роботи, і їх не можна використати вдруге. А от інший вид хімічних джерел електричного струму — *електричні акумулятори* — можна використовувати багаторазово.

Акумулятори, як і гальванічні елементи, складаються з двох електродів, поміщених в електроліт. Так, свинцевий акумулятор, використовуваний в автомобілях, має один електрод зі свинцю, а другий — із оксиду свинцю (плюмбум діоксиду); електролітом слугує водний розчин сульфатної кислоти.

Якщо електроди (полюси) зарядженого акумулятора під'єднати, наприклад, до електричної лампи розжарення, то в її нитці потече струм. Усередині ж акумулятора відбуватимуться хімічні реакції, в результаті яких електрод із свинцю весь час буде заряджений негативно, а електрод із оксиду свинцю — позитивно. При цьому сульфатна кислота перетворюватиметься на воду. Коли концентрація сульфатної кислоти зменшиться до певного граничного значення, акумулятор розрядиться — припинить роботу. Однак його можна знову зарядити. Під час заряджання акумулятора хімічні реакції йдуть у зворотному напрямку і концентрація сульфатної кислоти відновлюється.

5 Застосовуємо хімічні джерела електричного струму

Акумулятори, як і гальванічні елементи, зазвичай об'єднують й одержують відповідно *акумуляторну батарею* і *батарею гальванічних елементів* (рис. 25.7).

За принципом дії сучасні хімічні джерела струму майже не відрізняються від тих, що були створені близько двох століть тому. При цьому нині існує велика кількість різноманітних видів гальванічних елементів і акумуляторів та здійснюється активна розробка нових. Один від одного вони відрізняються розмірами, масою, енергоємністю, терміном роботи, надійністю, безпекою, вартістю тощо.

Вибір того чи іншого хімічного джерела струму продиктований сферою його застосування. Так, в автомобілях доцільно використовувати

Рис. 25.7. Широко використовувані хімічні джерела електричного струму: батарея гальванічних елементів (*а*); акумуляторні батареї (*б*, *в*)

відносно дешеві кислотні акумуляторні батареї, і те, що вони досить важкі, не є вирішальним. А от джерела струму для мобільних телефонів мають бути легкими та безпечними, тому в них варто використовувати, наприклад, літій-іонні батареї, хоча вони є порівняно дорогими.

Підбиваємо підсумки

Пристрої, які перетворюють різні види енергії на електричну енергію, називають джерелами електричного струму.

У джерелах електричного струму відбувається розділення різнойменних електричних зарядів, у результаті чого на одному полюсі джерела накопичується позитивний заряд, на другому — негативний, а отже, створюється електричне поле.

У джерелах електричного струму робота з розділення різнойменних зарядів виконується за рахунок механічної, хімічної, теплової та інших видів енергії.

До хімічних джерел електричного струму належать гальванічні елементи й акумулятори. Гальванічний елемент — хімічне джерело електричного струму одноразового використання. Акумулятор — хімічне джерело електричного струму багаторазового використання.

Контрольні запитання

1. Які пристрої називають джерелами електричного струму? **2.** Які процеси відбуваються в джерелах електричного струму? **3.** Чому для розділення різнойменних зарядів необхідно виконати роботу? **4.** За рахунок якої енергії може здійснюватися розділення різнойменних зарядів у джерелі електричного струму? **5.** Які джерела електричного струму ви знаєте? Наведіть приклади їх використання в техніці.

Вправа № 25

1. Які перетворення енергії відбуваються: а) під час заряджання акумулятора? б) під час роботи акумулятора?

2. Як на двох електроскопах, які з'єднані металевим провідником (див. рис. 23.1, *б*), підтримувати протилежні за знаком електричні заряди?

3. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи гідроелектростанції?

4. Чи працюватиме найпростіший гальванічний елемент (див. рис. 25.5), якщо для його виготовлення взяти пластинки з однакового металу?

5. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, які спостереження та досліди Л. Ґальвані підштовхнули А. Вольту до створення хімічного джерела електричного струму.

6. Загальна потужність генераторів Дністровської гідроелектростанції дорівнює 702 МВт, ККД — 92 %; висота падіння води — 54 м. Визначте масу води, що падає з греблі за хвилину.

Експериментальне завдання

«Фруктова батарейка». Візьміть лимон, мідну монету (або дріт), залізний цвях і виготовте із цих предметів гальванічний елемент. Намалюйте його будову, зазначте назви основних елементів. Якщо у вас є тестер (мультиметр), переконайтеся, що ваше джерело струму працює. Якщо тестера немає, принесіть ваш пристрій до школи та перевірте його за допомогою гальванометра. Поміркуйте, яким фруктом або овочем можна замінити лимон.

§ 26. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТИ

Щоб розібратися в будові електричного пристрою або усунути несправність електропроводки в оселі, передусім необхідно мати схему відповідного електричного кола. Про те, що таке електричне коло, із чого воно складається і як на його схемі зображують деякі електричні пристрої, ви дізнаєтеся, вивчивши матеріал цього параграфа.

1 Знайомимося з електричним колом

Будь-який електричний пристрій — мобільний телефон, планшет, ноутбук, ліхтарик, цифровий фотоапарат, калькулятор та ін. — має певний набір обов'язкових елементів. Щоб виділити ці обов'язкові елементи та зрозуміти їхнє призначення, створимо модель найпростішого електричного пристрою — кишенькового ліхтарика (рис. 26.1).

Щоб електричний пристрій працював, передусім необхідне *джерело струму*. У поданій моделі джерелом струму є батарея гальванічних елементів (1). Батарея має два виводи (полюси). Вивід батареї, на якому накопичується надлишковий позитивний заряд, позначений знаком «+».

Другий обов'язковий елемент — *споживач електричної енергії*. У поданій моделі — це електрична лампа (2). Будь-який споживач теж має два виводи (у лампі вони розташовані на цоколі — металевому циліндрі з нарізкою, що з'єднаний зі скляним балоном).

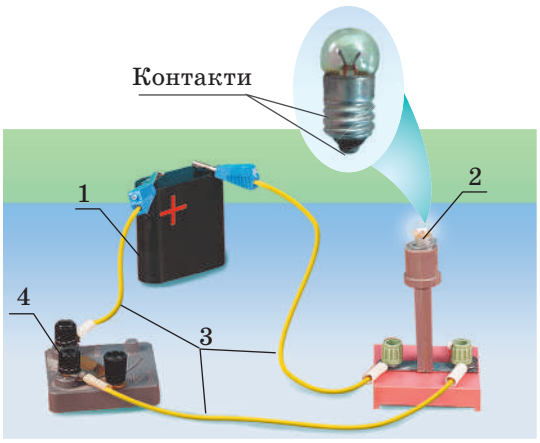


Рис. 26.1. Модель найпростішого електричного пристрою (ліхтарика):
1 — джерело струму — батарея гальванічних елементів;
2 — споживач електричної енергії — лампа;
3 — з'єднувальні проводи;
4 — ключ

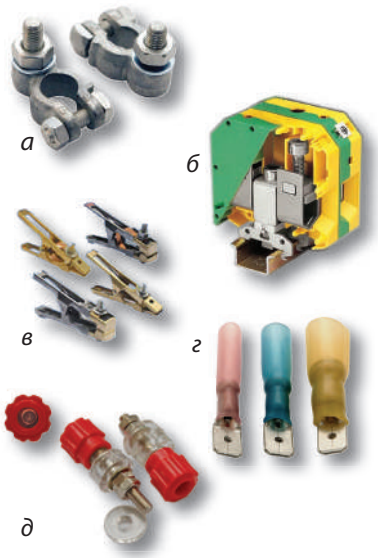


Рис. 26.2. Різні затискачі (клеми) для з'єднування провідників: акумуляторні (*а*); високовольтні (*б*); заземлення (*в*); ножові (*г*); приладні (*д*)

Джерело струму та споживач з'єднані за допомогою *з'єднувальних елементів* — проводів* (3). Для кріплення проводів використовують спеціальні пристрої (рис. 26.2), паяння або зварювання.

І, нарешті, останній елемент. Щоб було зручно вмикати й вимикати споживачі, використовують різноманітні *замикальні (розмикальні) пристрої*: ключ, рубильник, механічний або електронний вимикач, кнопку, розетку, реле. У моделі, що розглядається (див. рис. 26.1), таким пристроєм є ключ (4).

З'єднані провідниками в певному порядку джерело струму, споживачі, замикальні (розмикальні) пристрої складають ***електричне коло.***

Зверніть увагу: в реальному пристрої важливим є *певний порядок з'єднання елементів електричного кола.*

На рис. 26.3 зображено два найпростіші електричні кола, які містять однакові елементи. При цьому спосіб з'єднання деяких елементів (ламп) є різним. На рис. 26.3, *а* лампи з'єднані *послідовно*, на рис. 26.3, *б* — *паралельно.*

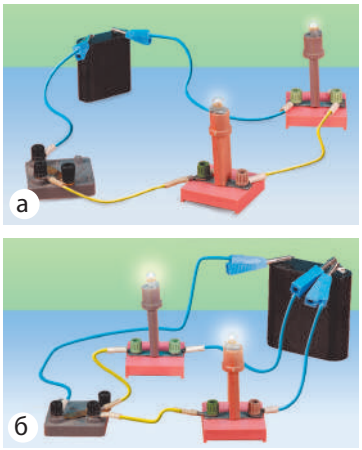


Рис. 26.3. Два способи з'єднання ламп в електричному колі: *а* — послідовне; *б* — паралельне

2 Знайомимося з механічним аналогом електричного кола

Щоб краще зрозуміти призначення елементів електричного кола, розглянемо його механічний аналог. Механічна модель (рис. 26.4) складається з двох наповнених водою посудин (*П*+ і *П*–), трубки (3), вертушки (2) і... вашого товариша (1), завданням якого буде безперервне переливання води з посудини *П*– до посудини *П*+. Зануривши один кінець трубки в посудину з більш високим рівнем

* У поданій на рис. 26.1 моделі довжину з'єднувальних проводів штучно зроблено надмірною. На практиці конструктори максимально зменшують усі «зайві» елементи. Так, в електричному ліхтарику роль одного з'єднувального проводу часто виконує металевий корпус. Другий провід теж відсутній: один із виводів джерела струму безпосередньо контактує з виводом лампи.

води (*П+*), створимо «водяний струм», який спричинятиме обертання вертушки.

Щоб вертушка не зупинялася, необхідно безперервно підтримувати «водяний струм». А він буде існувати, допоки існує різниця рівнів води в посудинах, тобто допоки ваш товариш переливатиме воду. І так само електричний струм буде існувати в колі, допоки працює джерело струму. Безперервно «перетягуючи» заряди з одного полюса на другий, джерело струму створює та підтримує електричне поле. Ви, напевно, здогадалися: «водяний струм» у механічній моделі є аналогом електричного струму.

Рис. 26.4. Механічний аналог електричного кола, поданого на рис. 26.1. Відповідність елементів можна простежити за цифрами, якими вони позначені на рисунках

Механічним аналогом якого елемента електричного кола є трубка з водою?

Ми можемо закрити трубку корком і таким чином зупинити потік води. Отже, у цьому випадку корок є механічним аналогом ключа в електричному колі.

Якщо заморозити воду в трубці, «водяний струм» зупиниться. Таким чином, умовою безперервного плину є наявність «субстанції», яка може вільно пересуватися. Для електричного кола такою «субстанцією» є вільні заряджені частинки (наприклад, електрони в металах або йони в рідинах).

Зверніть увагу на те, що зовсім не обов'язково бачити плин води в трубці. Його наявність можна зафіксувати, спостерігаючи, наприклад, за обертанням вертушки. Так само висновок про наявність електричного струму ми робимо, коли спостерігаємо за його діями.

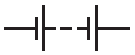
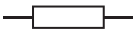
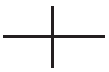
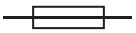
3 Знайомимося з електричними схемами

Щоб показати, які саме електричні пристрої необхідні для одержання певного електричного кола і як їх потрібно з'єднувати, використовують *електричні схеми* (часто їх називають просто *схемами*).

Електрична схема — це креслення, на якому умовними позначеннями показано, з яких елементів складається електричне коло і в який спосіб ці елементи з'єднані між собою.

Умовні позначення деяких елементів електричного кола наведено в таблиці на с. 138. Зверніть увагу на позначення джерел струму (гальванічного елемента або акумулятора та батареї гальванічних елементів або акумуляторів): прийнято, що довга риска позначає позитивний полюс джерела струму, а коротка — негативний.

Деякі умовні позначення, застосовувані на схемах

Елемент електричного кола	Умовне позначення
Гальванічний елемент або акумулятор	
Батарея гальванічних елементів або акумуляторів	
Резистор	
Електричний дзвінок	
Штепсельна розетка	
З'єднання проводів	
Перетин проводів (без з'єднання)	
Затискачі для під'єднання чого-небудь	
Ключ	
Електрична лампа	
Нагрівальний елемент	
Запобіжник	

Напрямок струму показують на схемах стрілкою.

За напрямок струму в колі прийнято напрямок, у якому рухалися б по колу частинки, що мають позитивний заряд, тобто напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного.

Зверніть увагу: в металевому провіднику електрони під дією електричного поля джерела струму рухаються від негативного полюса до позитивного, тобто *напрямок руху електронів є протилежним прийнятому напрямку струму.*

На рис. 26.5 наведено схеми електричних кіл, зображених на рис. 26.1, 26.3, та показано напрямок струму в них.

Розглянемо схему складнішого електричного кола (рис. 26.6).

Коло має три вимикачі (ключі), два споживачі струму (електричну лампу та електрообігрівач) і джерело струму (акумуляторну батарею).

Якщо замкнути ключі K_1 і K_2, а ключ K_3 розімкнути, то коло, споживачем у якому є лампа, буде замкнене на джерело струму — і лампа світитиметься. Якщо замкнути ключі K_1 і K_3, а ключ K_2 розімкнути, то працюватиме електрообігрівач, а лампа світитися не буде. Якщо ж замкнути всі три ключі, то одночасно світитиметься лампа і працюватиме електрообігрівач.

Чи буде працювати хоча б один споживач, якщо розімкнути тільки ключ K_1? якщо замкнути тільки ключ K_1? Якщо буде, то який?

Підбиваємо підсумки

З'єднані провідниками джерело струму, споживач електричної енергії, вмикач (вимикач) утворюють найпростіше електричне коло.

Креслення, на якому умовними позначеннями показано, з яких елементів складається електричне коло і в який спосіб ці елементи з'єднані між собою, називають електричною схемою.

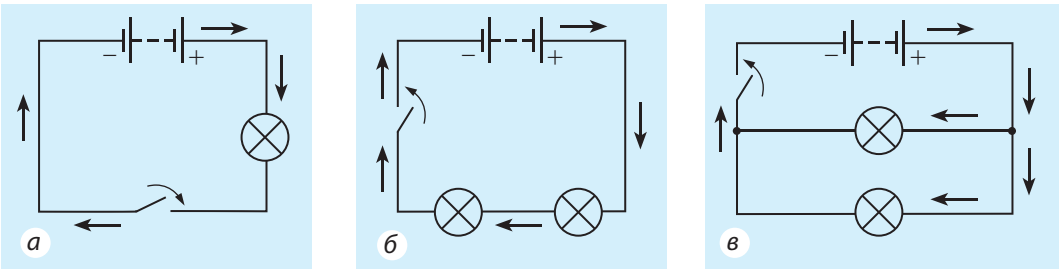


Рис. 26.5. Схеми деяких електричних кіл: *а* — схема електричного кола вмикання лампи (див. рис. 26.1); *б* — схема послідовного з'єднання двох ламп (див. рис. 26.3, *а*); *в* — схема паралельного з'єднання двох ламп (див. рис. 26.3, *б*). Стрілками позначено напрямок струму в разі замкнення ключа

За напрямок струму в колі умовно прийнято напрямок, у якому б рухалися по колу позитивно заряджені частинки, тобто напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного.

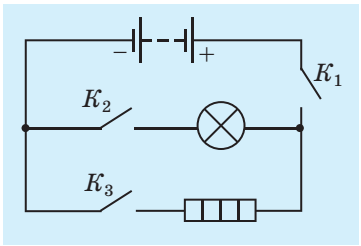


Рис. 26.6. Схема вмикання електричної лампи та обігрівача

Контрольні запитання

1. Назвіть основні елементи електричного кола. **2.** Використовуючи механічну аналогію, поясніть призначення кожного елемента електричного кола. **3.** Наведіть приклади споживачів електричної енергії. **4.** З якою метою в електричних колах використовують ключ? **5.** Що називають електричною схемою? **6.** Як на електричних схемах зображують гальванічний елемент? батарею гальванічних елементів? електричний дзвінок? ключ? **7.** Який напрямок прийнято за напрямок струму в електричному колі?

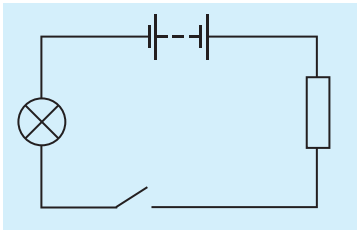


Рис. 1

Вправа № 26

1. На рис. 1 зображено схему електричного кола. Перенесіть схему до зошита, знаками «+» і «−» позначте полюси джерела струму, стрілками покажіть напрямок електричного струму. Підпишіть назву кожного елемента кола.

2. Накресліть схему електричного кола, зображеного на рис. 2, стрілками покажіть напрямок струму в колі.

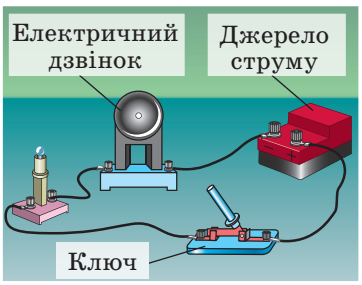


Рис. 2

3. Електричне коло складається з батареї акумуляторів, двох ключів, дзвінка та лампи, причому один ключ може вмикати тільки лампу, а другий — тільки дзвінок. Накресліть схему електричного кола.

4. Накресліть схему електричного кола, яке містить два дзвінки, що вмикаються одночасно одним ключем, і батарею гальванічних елементів. (*Зверніть увагу:* завдання можна виконати двома способами.) Де можна застосувати таке з'єднання?

5. Електричне коло складається з батареї акумуляторів, дзвінка, ключа та лампи, причому лампа світиться весь час, а дзвінок вмикається тільки в разі замкнення ключа. Накресліть схему електричного кола.

6. Заповніть таблицю.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця в СІ
Час		
Сила		
Електричний заряд		
Механічна робота		

Фізика і техніка в Україні

Інститут електродинаміки НАН України (Київ) — провідний науковий заклад у галузі енергетики, електротехніки й енергетичного машинобудування України.

Інститут електродинаміки був створений у 1947 р. на базі електротехнічного відділу Інституту енергетики АН УРСР і спочатку називався Інститутом електротехніки. Фундатором і першим директором інституту був академік *Сергій Олексійович Лебедєв*, під керівництвом якого в 1950 р. було створено першу на євразійському континенті *Малу електронно-обчислювальну машину* («МЕОМ»).

Основні наукові напрями роботи Інституту електродинаміки: перетворення і стабілізація параметрів електромагнітної енергії; підвищення ефективності та надійності процесів електромеханічного перетворення енергії; аналіз, оптимізація й автоматизація режимів електроенергетичних систем; інформаційно-вимірювальні системи і метрологічне забезпечення в електроенергетиці; комплексні енергетичні системи з відновлювальними джерелами енергії.

У різні роки Інститут електродинаміки очолювали видатні вчені: члени-кореспонденти АН УРСР *А. Д. Нестеренко* і *О. М. Мілях*, академік НАН України *А. К. Шидловський*.

§ 27. СИЛА СТРУМУ. ОДИНИЦЯ СИЛИ СТРУМУ. АМПЕРМЕТР

Ви вже знаєте, що для кількісного опису фізичних явищ, властивостей тіл і речовин фізики використовують фізичні величини. А за допомогою яких фізичних величин можна кількісно описати процес проходження електричного струму в провіднику? Про одну з них ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 З'ясовуємо, що називають силою струму

У металевому стрижні (металевому провіднику) є велика кількість носіїв струму — вільних заряджених частинок, а саме електронів.

Коли в стрижні не тече струм, рух електронів у ньому хаотичний. Тому можна вважати, що кількість електронів, які за одну секунду проходять через поперечний переріз стрижня (рис. 27.1) зліва направо, дорівнює кількості електронів, що проходять через нього справа наліво.

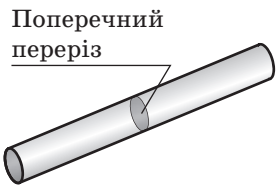


Рис. 27.1. Уявно розрізавши стрижень, одержуємо його поперечний переріз

Якщо приєднати стрижень до джерела струму, в провіднику виникне електричне поле, внаслідок дії якого електрони почнуть рухатися напрямлено і кількість електронів, які проходять за певний час через поперечний переріз в одному напрямку, істотно збільшиться. Отже, у цьому напрямку через поперечний переріз стрижня буде перенесено певний заряд q.

Сила струму — це фізична величина, що характеризує електричний струм і чисельно дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Силу струму позначають символом I та визначають за формулою:

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

де q — заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за час t.

Рис. 27.2. Андре Марі Ампер (1775–1836) — французький фізик, математик і хімік, один із засновників учення про електромагнітні явища. Ампер першим увів у фізику поняття електричного струму

Щоб краще усвідомити суть уведеної фізичної величини, знову звернемося до механічної моделі електричного кола (див. рис. 26.4). Механічним аналогом сили струму є маса води, що проходить через поперечний переріз трубки за 1 с.

Рис. 27.3. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць (СІ)

2 Знайомимося з одиницею сили струму

Одиниця сили струму в СІ — **ампер**:

$$[I] = 1 \text{ А}.$$

Ця одиниця названа на честь французького вченого *А. Ампера* (рис. 27.2). Ампер — одна з основних одиниць СІ (рис. 27.3).

Крім ампера на практиці часто застосовують кратні й частинні одиниці сили струму. Так, для вимірювання малої сили струму використовують *міліампери* (мА) і *мікроампери* (мкА), великої сили струму — *кілоампери* (кА).

Щоб уявити, що означає велика чи мала сила струму, розглянемо декілька прикладів. Сила струму в каналі блискавки сягає 500 кА, сила струму в аксоні під час передачі нервового імпульсу становить лише 0,004 мкА, а середня сила струму під час лікування електрофорезом — 0,8 мА.

Згадайте, яким множникам відповідають префікси кіло-, мікро-, мілі- та подайте наведені значення сили струму в амперах.

Рис. 27.4. Значення сили струму в деяких електротехнічних пристроях

Значення сили струму в деяких електротехнічних пристроях наведено на рис. 27.4.

Сила струму, що проходить через тіло людини, вважається безпечною, якщо її значення не перевищує 1 мА; сила струму 100 мА може призвести до серйозних уражень. Тому, щоб не наражатися на смертельну небезпеку під час роботи з електротехнічними приладами й пристроями, необхідно суворо дотримуватися правил безпеки. Загальну інструкцію з безпеки подано на форзаці підручника. Ми ж зупинимося на головних моментах, які слід пам'ятати всім, хто має справу з електрикою.

НЕ МОЖНА:

- торкатись оголеного проводу, особливо стоячи на землі, сирій підлозі тощо;
- користуватися несправними електротехнічними пристроями;
- збирати, розбирати, ремонтувати електротехнічні пристрої, не від'єднавши їх від джерела струму.

3 Даємо означення одиниці електричного заряду

Знаючи одиницю сили струму, легко одержати означення одиниці електричного заряду в СІ. Оскільки $I = \frac{q}{t}$, то $q = It$. Отже:

$$1\,\text{Кл} = 1\,\text{А}\cdot\text{с}.$$

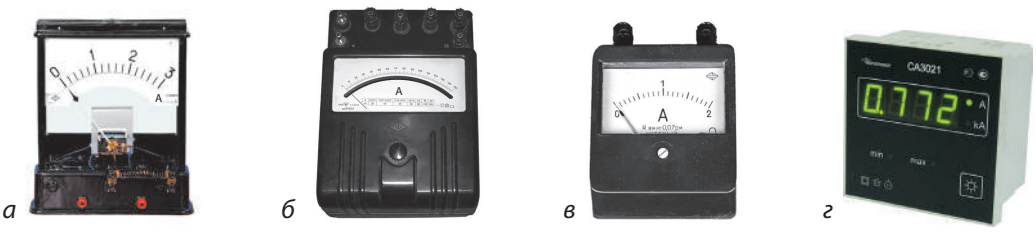
1 Кл — *це заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за* 1 с *при силі струму в провіднику* 1 А.

4 Вимірюємо силу струму

Для вимірювання сили струму використовують прилад, який називається **амперметр** (рис. 27.5).

(A) — умовне позначення амперметра на електричних схемах.

Як і будь-який вимірювальний прилад, амперметр не має впливати на значення вимірюваної величини. Тому амперметр сконструйований таким чином, що в разі приєднання його до електричного кола значення сили струму в колі практично не змінюється.



а *б* *в* *г*

Рис. 27.5. Деякі види амперметрів: *а* — демонстраційний; *б* — лабораторний із дзеркальною шкалою; *в* — шкільний лабораторний; *г* — електронний

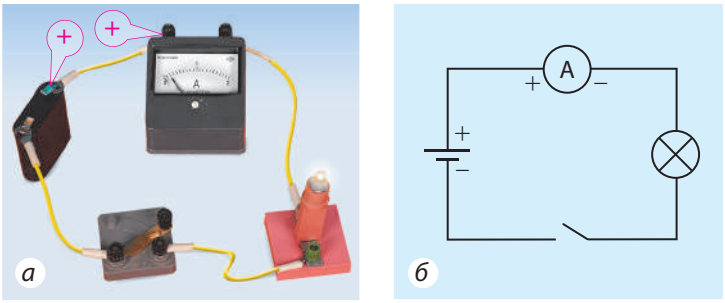


Рис. 27.6. Вимірювання амперметром сили струму, який проходить через нитку розжарення лампи: *а* — загальний вигляд електричного кола; *б* — схема

Правила вимірювання сили струму амперметром

1. Амперметр вмикають у коло послідовно з тим споживачем, у якому необхідно виміряти силу струму (рис. 27.6).
2. Клему амперметра, біля якої стоїть знак «+», потрібно з'єднувати з проводом, що йде від позитивного полюса джерела струму, клему зі знаком «–» — із проводом, що йде від негативного полюса.
3. Не можна приєднувати амперметр до кола, в якому відсутній споживач струму, — це може призвести до псування обладнання або пожежі.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Скільки електронів пройде через поперечний переріз нитки розжарення лампи за 2 с, якщо сила струму в нитці становить 0,32 А?

Аналіз фізичної проблеми. Щоб визначити кількість N електронів, необхідно знати загальний заряд q, перенесений за 2 с, і заряд e одного електрона. Загальний заряд знайдемо з означення сили струму; заряд одного електрона дорівнює $-1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл.

Дано:

$t = 2$ с

$I = 0{,}32$ А

$e = -1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл

Знайти:

N — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За означенням сили струму: $I = \dfrac{q}{t}$, тому $q = It$. Знаючи загальний заряд, знайдемо кількість електронів:

$$N = \frac{q}{|e|} = \frac{It}{|e|}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{А}\cdot\text{с}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}} = 1;$$

$$N = \frac{0{,}32\cdot 2}{1{,}6\cdot10^{-19}} = 4\cdot10^{18}.$$

Відповідь: $N = 4\cdot10^{18}$ електронів.

Підбиваємо підсумки

Сила струму I — фізична величина, що характеризує електричний струм і чисельно дорівнює заряду q, який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу: $I = \frac{q}{t}$.

Одиниця сили струму в СІ — ампер (А). Ампер — це одна з основних одиниць СІ. 1 Кл — це заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 с, коли сила струму в провіднику становить 1 А.

Силу струму вимірюють амперметром. Амперметр приєднують до електричного кола послідовно зі споживачем, у якому вимірюють силу струму.

Контрольні запитання

1. Що називають силою струму? **2.** За якою формулою визначають силу струму? **3.** Яка одиниця сили струму? На честь кого її названо? **4.** Яке значення сили струму безпечне для людини? **5.** Яких основних правил безпеки необхідно дотримуватися під час роботи з електротехнічними пристроями? **6.** Дайте означення кулона. **7.** Яким приладом вимірюють силу струму? **8.** Які правила необхідно виконувати, вимірюючи силу струму?

Вправа № 27

1. Перенесіть схему електричного кола (рис. 1) до зошита. Покажіть на схемі, де можна приєднати амперметр, щоб виміряти силу струму в лампах. Знаками «+» і «–» позначте полярність клем амперметра.

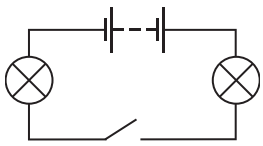


Рис. 1

2. Сила струму в провіднику 200 мА. Протягом якого часу через поперечний переріз провідника проходить заряд, що дорівнює 24 Кл?

3. Накресліть схему електричного кола (рис. 2), позначте на ній полярність клем амперметра. Як, на вашу думку, зміниться показ амперметра, якщо одна з ламп перегорить?

4. На рис. 3 показано вимірювання сили струму в електричному колі. Накресліть схему електричного кола, позначте полярність клем амперметра. Визначте заряд, який проходить через поперечний переріз нитки розжарення лампи за 10 хв.

5. Чому дорівнює сила струму в провіднику, якщо за 10 с через його поперечний переріз проходить $2 \cdot 10^{20}$ електронів?

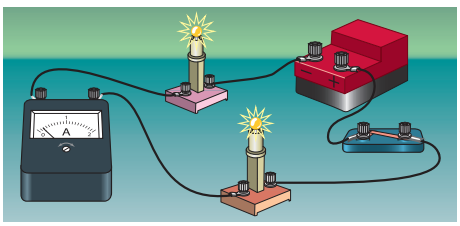


Рис. 2

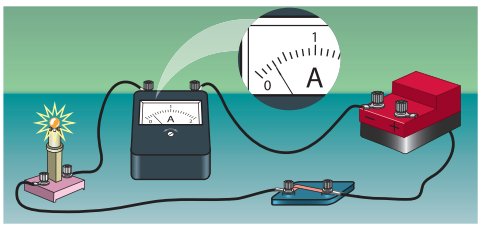


Рис. 3

§ 28. ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА. ОДИНИЦЯ НАПРУГИ. ВОЛЬТМЕТР

Кожний, напевно, чув застережливе «Не підходь — там висока напруга!», обурене «Знову впала напруга в мережі!», запитальне «На яку напругу розрахований цей прилад?». Із цього параграфа ви дізнаєтеся, що таке напруга і чому на всіх електротехнічних пристроях наводять її значення.

1 Даємо означення електричної напруги

У § 23 було доведено, що напрямлений рух вільних заряджених частинок (електричний струм) можливий завдяки дії на ці частинки сили з боку електричного поля. А з курсу фізики 7 класу вам відомо, що коли тіло рухається внаслідок дії певної сили і напрямок руху тіла збігається з напрямком дії цієї сили, то сила виконує роботу. Отже, коли в певній ділянці кола існує струм, то електричне поле виконує роботу. Цю роботу прийнято називати *роботою струму*.

Робота, яку може виконати або виконує електричне поле, переміщуючи заряд по даній ділянці кола, визначається *електричною напругою*.

Електрична напруга на ділянці кола — це фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду по цій ділянці.

Напругу позначають символом U і в загальному випадку визначають за формулою:

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

де A — робота, яку виконує (або може виконати) електричне поле з переміщення заряду q по даній ділянці кола.

Одиниця напруги в СІ — **вольт** (названа на честь італійського вченого А. Вольти):

$$[U] = 1 \text{ В}.$$

1 В — *це така напруга на ділянці кола, за якої електричне поле виконує роботу* 1 Дж, *переміщуючи по цій ділянці заряд, що дорівнює* 1 Кл:

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

Крім вольта, на практиці часто застосовують кратні й частинні одиниці напруги: *мікровольт* (мкВ), *мілівольт* (мВ), *кіловольт* (кВ):

$$1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{В}; \ 1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{В}; \ 1 \text{ кВ} = 10^{3} \text{В}.$$

Так, електрична напруга на клітинній мембрані або мікрочипі становить кілька мікровольтів, а між хмарами під час грози — сотні кіловольтів.

А чи знаєте ви, яка напруга подається у ваш будинок? на акумулятор вашого мобільного телефона під час його заряджання?

2 Проводимо аналогію

Звернувшись до аналогії між електричним струмом і плином води (див. § 26), можна визначити, що напруга аналогічна різниці рівнів води в посудинах. Якщо рівні води в посудинах однакові, то вода не переливатиметься. Аналогічно, якщо на ділянці електричного кола відсутня напруга, то струму в ділянці не буде.

Чим більшою є різниця рівнів води в посудинах, тим більшу роботу виконає сила тяжіння під час падіння води масою 1 кг. Відповідно чим більшою є напруга на ділянці кола, тим більшу роботу виконає електрична сила під час переміщення цією ділянкою заряду 1 Кл.

3 Вимірюємо напругу, знайомимося з вольтметром

Для вимірювання напруги використовують прилад, який називається **вольтметр** (рис. 28.1). Вольтметр дуже схожий на амперметр — і зовні, і за принципом дії.

(V) — умовне позначення вольтметра на електричних схемах.

Як і будь-який вимірювальний прилад, вольтметр не має впливати на значення вимірюваної величини. У разі паралельного приєднання вольтметра до певної ділянки кола значення напруги на цій ділянці практично не змінюється.

Правила, яких необхідно дотримуватися під час вимірювання напруги вольтметром

1. Вольтметр приєднують паралельно до тієї ділянки кола, на якій необхідно виміряти напругу (рис. 28.2).
2. Клему вольтметра, біля якої стоїть знак «+», слід з'єднувати з проводом, який іде від позитивного полюса джерела струму; клему зі знаком «−» — із проводом, який іде від негативного полюса.
3. Для вимірювання напруги на виході джерела струму вольтметр приєднують безпосередньо до полюсів джерела (рис. 28.3).

а *б*

Рис. 28.1. Деякі види вольтметрів: *а* — шкільний демонстраційний; *б* — цифровий автомобільний

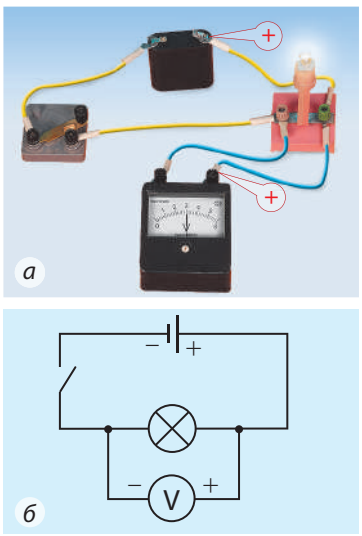


Рис. 28.2. Вимірювання вольтметром напруги на лампі: *а* — загальний вигляд; *б* — схема електричного кола

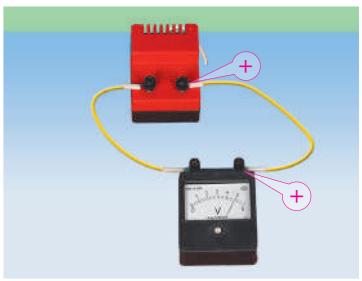


Рис. 28.3. Вимірювання вольтметром напруги на виході джерела струму

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Напруга на клемах автомобільного акумулятора становить 12 В. З якої висоти має впасти вантаж масою 36 кг, щоб сила тяжіння виконала ту саму роботу, яку виконує електричне поле, переміщуючи заряд 300 Кл по одному з електричних кіл автомобіля?

Аналіз фізичної проблеми. За умовою задачі робота сили тяжіння дорівнює роботі електричного струму: $A = A_{\text{струму}}$. Записавши формулу для визначення роботи сили тяжіння та формулу роботи струму, визначимо висоту падіння вантажу.

Дано:

$U = 12$ В

$m = 36$ кг

$A = A_{\text{струму}}$

$q = 300$ Кл

$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$

Знайти:

h — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За означенням напруги $U = \frac{A_{\text{струму}}}{q}$, отже, $A_{\text{струму}} = Uq$.

За означенням механічної роботи $A = Fl$, де $F = F_{\text{тяж}} = mg$, а $l = h$.

Отже, $A = mgh$.

Оскільки $A_{\text{струму}} = A$, то $Uq = mgh$; звідси $h = \frac{Uq}{mg}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[h] = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{кг}}} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \text{Кл}}{\text{Н}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м};$$

$$h = \frac{12 \cdot 300}{36 \cdot 10} = 10 \text{ (м)}.$$

Відповідь: $h = 10$ м.

Підбиваємо підсумки

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду по певній ділянці кола, називають електричною напругою на цій ділянці кола.

Напругу позначають символом U і визначають за формулою $U = \frac{A}{q}$, де A — робота, яку виконує (або може виконати) електричне поле для переміщення заряду q по даній ділянці кола.

Одиниця напруги в СІ — вольт (В). Один вольт — це така напруга на ділянці кола, за якої електричне поле виконує роботу 1 Дж, переміщуючи по цій ділянці заряд, що дорівнює 1 Кл $\left(1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\right)$.

Прилад для вимірювання напруги називають вольтметром. Вольтметр приєднують паралельно тій ділянці кола, напругу на якій необхідно виміряти.

Контрольні запитання

1. Доведіть, що, коли в провіднику тече струм, електричне поле виконує роботу. **2.** Що називають напругою на деякій ділянці кола? **3.** За якою формулою визначають електричну напругу? **4.** У яких одиницях вимірюють напругу? **5.** Дайте означення одиниці напруги. **6.** Який прилад використовують для вимірювання напруги? Яких правил необхідно дотримуватися під час вимірювання напруги?

Вправа № 28

1. На рис. 1 зображено шкали різних вольтметрів. Визначте ціну поділки кожної шкали і напругу на кожному вольтметрі.

2. На рис. 2 зображено схему електричного кола. Перенесіть схему до зошита і покажіть на ній, де потрібно приєднати вольтметр, щоб виміряти напругу на лампі. Позначте полярність клем вольтметра.

3. Під час переміщення по ділянці кола заряду, що дорівнює 3 Кл, електричне поле виконало роботу 0,12 кДж. Визначте напругу на ділянці кола.

4. Електричне поле, переміщуючи ділянкою кола заряд 60 Кл, виконує ту саму роботу, яку виконує сила тяжіння під час падіння тіла масою 200 г з висоти 360 м. Чому дорівнює напруга на ділянці?

5. На рис. 3 зображено схему електричного кола. Визначте роботу електричного струму в лампі за 1 год, якщо покази амперметра і вольтметра становлять 0,5 А і 220 В відповідно.

6. Скориставшись додатковими джерелами інформації, складіть задачу на визначення роботи електричного струму в певному електротехнічному пристрої.

7. За графіком залежності сили пружності ($F_{пруж}$) від видовження (x) пружини визначте жорсткість (k) пружини (рис. 4). Чи залежить жорсткість пружини від сили пружності? від видовження?

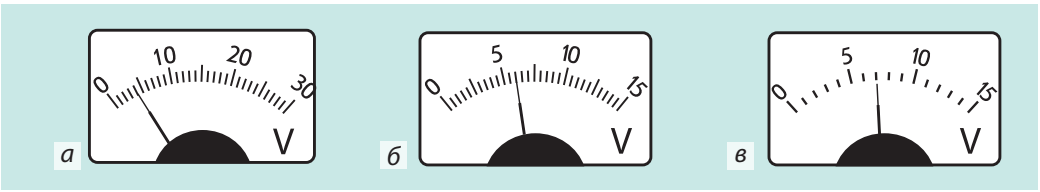


Рис. 1

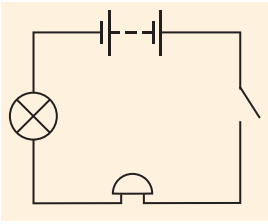


Рис. 2

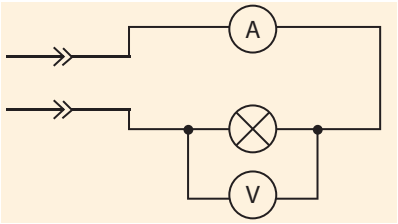


Рис. 3

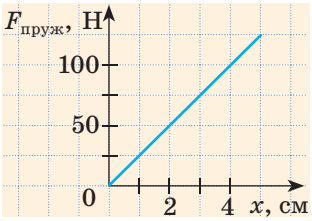


Рис. 4

§ 29. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР. ЗАКОН ОМА

Згадайте механічний аналог електричного кола, запропонований у § 26 (див. рис. 26.4). А тепер уявіть, що досить тривалий час саме ви будете «черпальником», тобто маєте підтримувати обертання вертушки. Як це зробити з найменшими зусиллями? Скоріше за все, ви намагатиметеся зробити так, щоб вода з трубки виливалася повільніше, і, очевидно, оберете для цього дуже тонку трубку, а перепад рівнів води в посудинах зробите якомога меншим.

Згадайте, що різниця рівнів води — аналог напруги, а кількість води, що пройшла через трубку за 1 с, — аналог сили струму. Отже, можна припустити, що сила струму в провіднику зменшується в разі зменшення напруги і залежить від провідних властивостей провідника. Перевіримо ці припущення.

1 Переконуємося, що сила струму в провіднику залежить від напруги на його кінцях

Складемо електричне коло, споживачем у якому буде металевий провідник (резистор), а джерелом струму — пристрій, на виході якого можна змінювати напругу. Для вимірювання сили струму в провіднику та напруги на його кінцях використаємо амперметр і вольтметр (рис. 29.1, *а*).

Дослід покаже, що в разі збільшення напруги на кінцях провідника у 2 рази сила струму в провіднику так само зросте у 2 рази (рис. 29.1, *б*); збільшення напруги у 2,5 разу приведе до зростання сили струму також у 2,5 разу (рис. 29.1, *в*) і т. д. Таким чином, у скільки разів збільшується напруга на кінцях провідника, у стільки ж разів зростає в провіднику сила струму. Інакше кажучи, *сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника*. Цю залежність першим експериментально встановив німецький учений *Г. Ом* (рис. 29.2) у 1826 р.

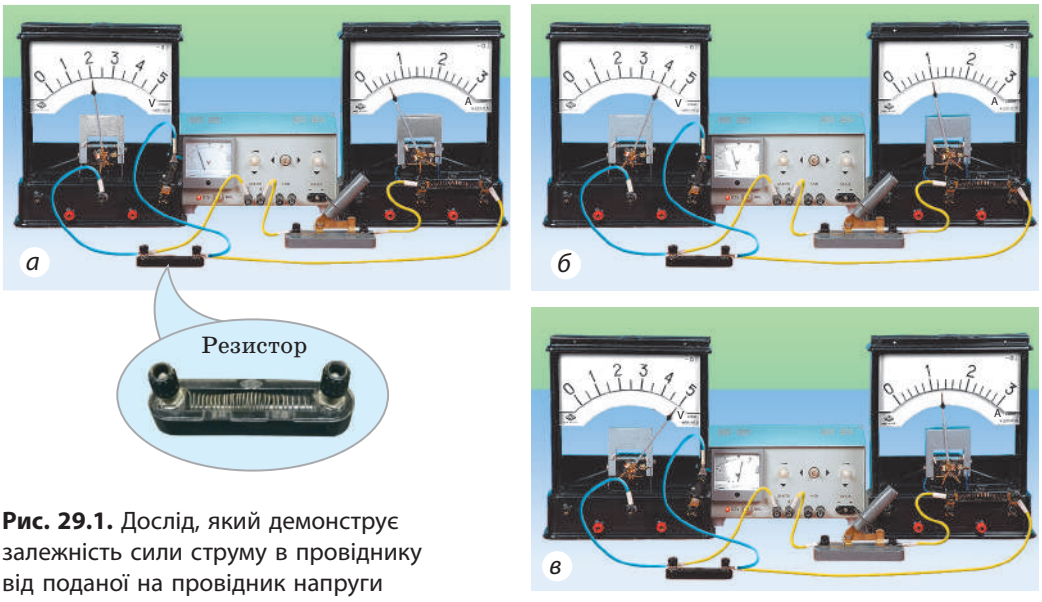


Рис. 29.1. Дослід, який демонструє залежність сили струму в провіднику від поданої на провідник напруги

З курсу математики вам відомо, що таку залежність можна передати формулою $I = kU$, де k — коефіцієнт пропорційності, а також у вигляді графіка, який являє собою пряму, що проходить через початок координат (рис. 29.3).

Залежність сили струму в провіднику від напруги на його кінцях називають **вольт-амперною характеристикою провідника**.

2 Дізнаємося про електричний опір

Провівши дослід, описаний у пункті 1, з іншими провідниками, побачимо, що в кожному провіднику сила струму є прямо пропорційною напрузі на його кінцях $(I = kU)$, а от коефіцієнт пропорційності буде різним, про що свідчать різні кути нахилу графіків (рис. 29.4). Отже, *сила струму в провіднику залежить* не тільки від напруги на його кінцях, але й *від властивостей самого провідника*.

На практиці залежність $I = kU$ записують у вигляді $I = \frac{1}{R} \cdot U$ * або $I = \frac{U}{R}$, де R — *електричний опір провідника*.

Сила струму менша в тому провіднику, який має більший опір. Тобто чим більшим є опір провідника, тим сильніше провідник протидіє проходженню струму — *створює йому опір*. (При цьому частина електричної енергії перетворюється на внутрішню енергію провідника.)

Електричний опір — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.

Одиниця електричного опору в СІ — **ом**:

$$[R] = 1 \text{ Ом}.$$

1 Ом — *це опір такого провідника, в якому за напруги на кінцях* 1 В *сила струму дорівнює* 1 А:

$$1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Рис. 29.2. Георг Сімон Ом (1787–1854) — німецький фізик, у 1826 р. експериментально відкрив закон, який був згодом названий його ім'ям

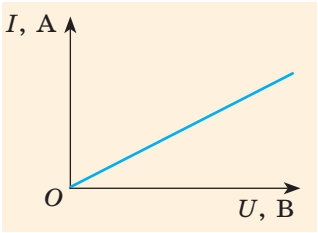


Рис. 29.3. Графік залежності сили струму в провіднику від напруги на його кінцях — пряма лінія

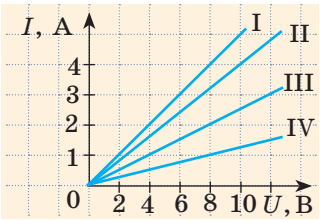


Рис. 29.4. Залежність сили струму від напруги для різних провідників

* Величину $\frac{1}{R}$ у фізиці називають *провідністю*. Одиниця провідності в СІ — *сименс* (См), названа так на честь німецького фізика й електротехніка *Ернста Вернера фон Сіменса* (1816–1892), засновника відомого концерну «Siemens». 1 См — електрична провідність провідника, який має опір 1 Ом.

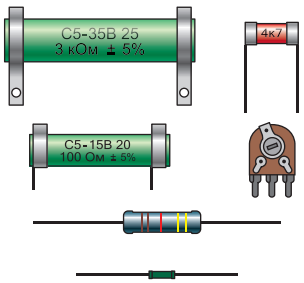


Рис. 29.5. Різні типи резисторів, які використовують в електротехніці. Опір резистора позначено на його корпусі

Більшість радіоелектронних пристроїв неможливо уявити без *резисторів* — деталей, що забезпечують певні о́пори (рис. 29.5).

3 Формулюємо закон Ома для ділянки кола

Усе те, що ви дізналися про залежність сили струму в провіднику від напруги на його кінцях, справджується і для ділянки кола, яка містить будь-яку кількість провідників. Отже, **закон Ома для ділянки кола:**

> Сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна електричному опору цієї ділянки кола.

Математичним записом закону Ома є формула:

$$I = \frac{U}{R},$$

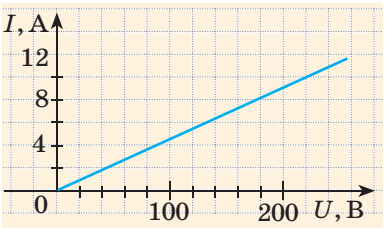
де R — *опір ділянки кола; він залежить тільки від властивостей провідників, що складають ділянку.*

Закон Ома — один із найважливіших фізичних законів, і переважна більшість розрахунків електричних кіл ґрунтується саме на ньому.

Скориставшись законом Ома, отримайте формулу для розрахунку опору провідника; для розрахунку напруги на кінцях провідника.

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. На рисунку подано вольт-амперну характеристику металевого провідника. Визначте опір цього провідника.



Аналіз фізичної проблеми. Графік залежності сили струму від напруги — пряма, тому для визначення опору скористаємося координатами будь-якої точки графіка та законом Ома.

Дано:
$I = 10$ А
$U = 220$ В

Знайти:
R — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Із графіка бачимо, що, наприклад, за напруги 220 В сила струму в провіднику дорівнює 10 А.

Відповідно до закону Ома $I = \frac{U}{R}$, отже, $R = \frac{U}{I}$.

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[R] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}; \quad R = \frac{220}{10} = 22 \text{ (Ом)}.$$

Відповідь: $R = 22$ Ом.

Підбиваємо підсумки

Сила струму I в ділянці кола прямо пропорційна напрузі U на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна електричному опору R даної ділянки кола. Цю закономірність називають законом Ома для ділянки кола та записують формулою $I = \frac{U}{R}$.

Електричний опір — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.

Одиниця опору в СІ — ом; 1 Ом — це опір такого провідника, в якому тече струм силою 1 А за напруги на кінцях провідника 1 В ($1\ \text{Ом} = 1\frac{\text{В}}{\text{А}}$).

Контрольні запитання

1. Опишіть дослід, який демонструє, що сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на його кінцях. **2.** Опишіть дослід, який демонструє, що сила струму в провіднику залежить від властивостей провідника. **3.** Дайте означення опору провідника. **4.** Що таке 1 Ом? **5.** Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.

Вправа № 29

1. Користуючись показами приладів (рис. 1), визначте опір електричної лампи.

2. На рис. 29.4 подано вольт-амперні характеристики кількох провідників. Визначте опори цих провідників.

3. Сила струму, який тече в спіралі кип'ятильника, дорівнює 1,5 А. Визначте напругу на спіралі, якщо її опір становить 150 Ом.

4. Опір провідника дорівнює 2 Ом. Подайте вольт-амперну характеристику цього провідника у вигляді графіка.

5. У провіднику, до кінців якого прикладено напругу 12 В, протягом 5 хв пройшов заряд 60 Кл. Визначте опір провідника.

6. Якщо в електричному колі (рис. 2) замкнути ключ, то стрілка амперметра розміститься так, як показано на рисунку. Визначте ціну поділки шкали амперметра.

7. Чи залежить опір провідника від сили струму в ньому? від напруги на його кінцях? Поясніть свою відповідь.

8. З мідного дроту, площа поперечного перерізу якого дорівнює 10 мм^2, виготовлено кільце діаметром 10 см. Визначте масу кільця.

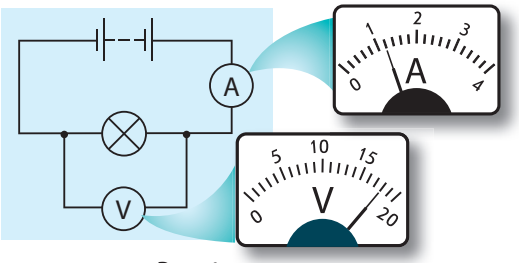


Рис. 1

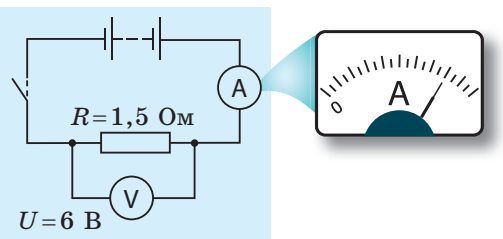


Рис. 2

§ 30. РОЗРАХУНОК ОПОРУ ПРОВІДНИКА. ПИТОМИЙ ОПІР РЕЧОВИНИ. РЕОСТАТИ

Ми так звикли до різноманітних технічних пристроїв, що часто не замислюємося, як вони працюють. Наприклад, кожен із вас збільшував гучність звуку плеєра чи телевізора або спостерігав за тим, як поступово гасне світло в кінозалі. Але чи ставили ви собі запитання: як це вдається? Спробуємо розібратися.

1 З'ясовуємо, від чого залежить опір провідника

Коли в металевому провіднику йде струм, вільні електрони, рухаючись напрямлено, зіштовхуються з йонами кристалічної ґратки металу — провідник чинить опір електричному струмові.

Опір провідника залежить від його довжини, площі поперечного перерізу, а також від речовини, з якої виготовлений провідник.

Переконаємося в цьому за допомогою дослідів, змінюючи кожного разу тільки один із зазначених параметрів. Опір провідника будемо визначати, користуючись законом Ома: вимірявши амперметром силу струму I в провіднику, а вольтметром — напругу U на його кінцях, обчислимо опір за формулою $R = \frac{U}{I}$.

Спочатку з'ясуємо, як опір провідника залежить від його довжини. Для цього складемо електричне коло (див. рис. 30.1), яке містить джерело струму, ключ, резистор і ніхромовий дріт, натягнутий на дерев'яну лінійку з двома клемами. Довжину ділянки дроту, в якій тече струм, змінюватимемо за допомогою повзунка — спеціального затискача, який можна легко пересувати вздовж провідника. Щоб вимірювати силу струму та напругу, до кола приєднаємо амперметр і вольтметр.

Провівши відповідні дослідження, переконаємося, що в разі зміни довжини провідника його опір також змінюється. Причому в скільки разів збільшується (зменшується) довжина провідника, у стільки ж разів збільшується (зменшується) його опір. Отже, *опір провідника прямо пропорційний його довжині*.

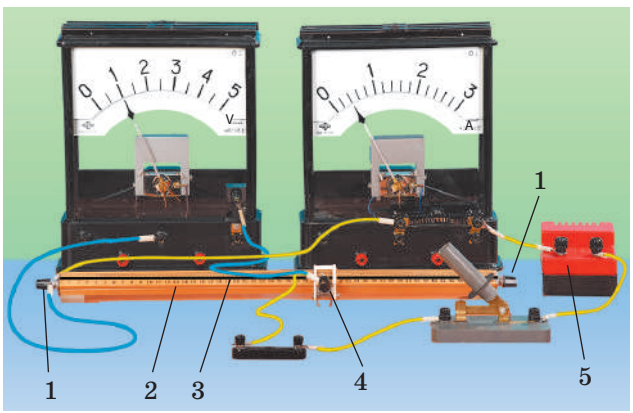


Рис. 30.1. Дослід, який доводить, що опір провідника прямо пропорційний його довжині. На рисунку:
1 — клеми;
2 — лінійка;
3 — ніхромовий дріт (провідник);
4 — повзунок;
5 — джерело струму

Щоб з'ясувати, як залежить опір провідника від площі його поперечного перерізу, використаємо кілька закріплених на панелі ніхромових провідників, однакових за довжиною, але різних за площею поперечного перерізу (рис. 30.2). Дослід показує, що збільшення вдвічі площі поперечного перерізу провідника спричиняє дворазове зменшення його опору, тобто *опір провідника обернено пропорційний площі його поперечного перерізу*.

Провівши досліди з провідниками, однаковими за довжиною і площею поперечного перерізу, але виготовленими з різних матеріалів (наприклад, міді, алюмінію, ніхрому), переконаємося, що *опір провідника залежить від речовини, з якої виготовлений провідник*.

Підсумовуючи результати дослідів, можна записати формулу:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де R — опір провідника; l — довжина провідника; S — площа поперечного перерізу провідника; ρ — коефіцієнт пропорційності, що залежить від речовини (матеріалу), з якої виготовлений провідник. Цей коефіцієнт називають *питомим опором речовини*.

2 Даємо означення питомого опору речовини

Звернемося до формули для обчислення опору провідника: $R = \rho \frac{l}{S}$. Із формули випливає, що $\rho = \frac{RS}{l}$. Якщо $l = 1$ м, а $S = 1$ м^2, то ρ чисельно дорівнює R.

Питомий опір речовини — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості даної речовини й чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника завдовжки 1 м і площею поперечного перерізу 1 м^2.

Одиниця питомого опору в СІ — **ом-метр**:

$$[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

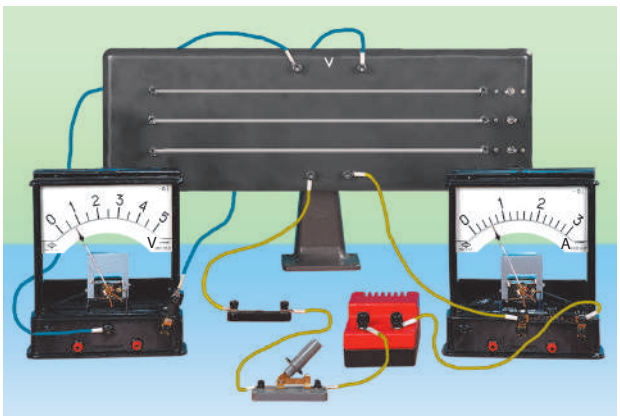


Рис. 30.2. Дослід, який доводить, що опір провідника обернено пропорційний площі його поперечного перерізу

На практиці здебільшого мають справу з провідниками, площі поперечних перерізів яких досить малі. Тому часто як одиницю питомого опору речовини використовують $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$. Оскільки $1\,\text{мм}^2 = 1\cdot10^{-6}\,\text{м}^2$, то

$$1\,\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}} = 1\cdot10^{-6}\,\text{Ом}\cdot\text{м}$$

Питомі опори речовин визначають дослідним шляхом і заносять у таблиці (див. табл. 7 *Додатка*). Значення питомого опору істотно залежить від температури речовини, тому в таблицях обов'язково зазначають температуру, за якої справджуються подані значення.

Скориставшись даними табл. 7 *Додатка*, поясніть, чому для виготовлення електропроводки в приміщеннях зазвичай використовують алюміній і мідь, а не значно дешевшу сталь. Чому гуму, склопластик, кераміку застосовують в електротехніці як ізолятори?

3 Знайомимося з реостатами

На тому факті, що опір провідника прямо пропорційний його довжині, базується принцип дії *реостатів*.

Реостат — це пристрій зі змінним опором, призначений для регулювання сили струму в електричному колі.

Якщо реостат ввести в електричне коло, то, змінюючи опір реостата, можна відповідно змінювати силу струму в колі $\left(I = \frac{U}{R}\right)$, а отже, настроювати гучність звуку радіоприймача, регулювати яскравість світіння лампи тощо.

З найпростішим реостатом ви вже зустрічалися, коли з'ясовували залежність опору провідника від його довжини (див. рис. 30.1). Звичайно, реостати, які застосовують на практиці, зручніші. Розглянемо *двоконтактний повзунковий реостат* (рис. 30.3). Металевий дріт (3) намотують на керамічний циліндр (2) і таким чином зменшують габарити реостата. Над обмоткою закріпляють металевий стрижень (5), на якому

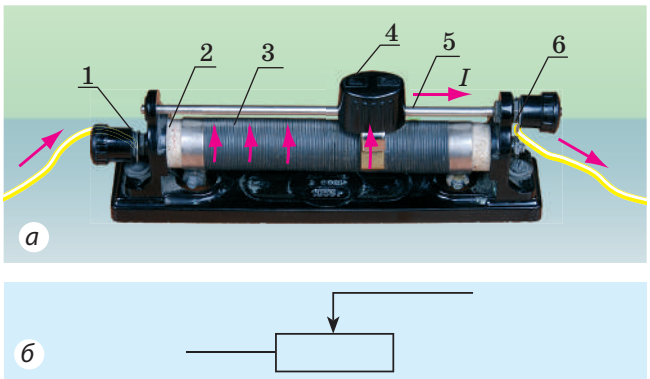


Рис. 30.3. Двоконтактний повзунковий реостат:
а — загальний вигляд:
1, 6 — клеми; 2 — керамічний циліндр; 3 — металевий дріт (обмотка); 4 — повзунок;
5 — металевий стрижень;
б — умовне позначення на схемах

розташовують повзунок (4). Реостат має дві клеми (два контакти), одна з яких (1) з'єднана з обмоткою, а інша (6) — зі стрижнем. Коли реостат приєднаний до кола, електричний струм проходить від однієї клеми до іншої (у даному випадку — від клеми (1) до клеми (6), тобто спочатку у витках обмотки до повзунка, а потім у стрижні).

Пересуваючи повзунок уздовж стрижня, збільшують або зменшують довжину l ділянки обмотки, в якій проходить струм. Оскільки $R = \rho\frac{l}{S}$, то опір реостата так само збільшується або зменшується, а це приводить до зміни сили струму.

На практиці крім повзункових реостатів використовують й інші типи реостатів, наприклад *важільні (секційні) реостати* (рис. 30.4). На відміну від повзункових, опір важільних реостатів змінюється стрибками, відповідно стрибками змінюється й сила струму. Важільні реостати застосовують для вмикання і вимикання електродвигунів.

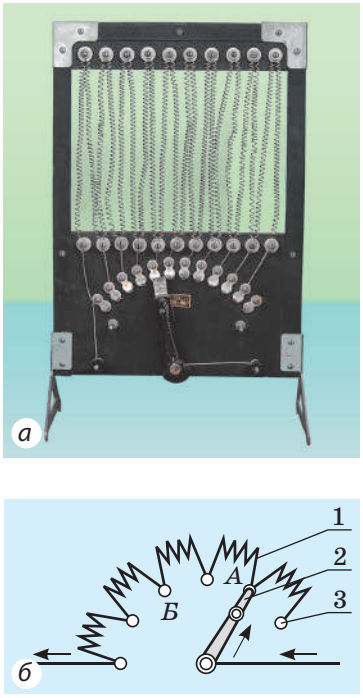


Рис. 30.4. Важільний (секційний) реостат:
а — загальний вигляд;
б — схема:
1 — металевий дріт;
2 — важіль;
3 — контакт;
стрілками показано напрямок струму

Розгляньте рис. 30.4, *б* і дізнайтесь, у скільки разів зменшиться опір секційного реостата, якщо важіль перемкнути з контакту *А* на контакт *Б*.

Кожний реостат розрахований на певну напругу. Максимальний опір реостата й найбільша можлива напруга на ньому зазначені в спеціальній таблиці на корпусі пристрою. Обмотки реостатів зазвичай виготовляють із металів (сплавів) з високим питомим опором (константан, манганін, ніхром, фехраль).

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. Обчисліть силу струму в мідному дроті, який має довжину 10 м і площу поперечного перерізу 0,5 мм^2; напруга на кінцях дроту становить 34 мВ.

Аналіз фізичної проблеми. Силу струму можна визначити за законом Ома. А для цього необхідно обчислити опір провідника. Скористаємося формулою для розрахунку опору провідника; питомий опір міді знайдемо у відповідній таблиці.

Дано:

$l = 10$ м

$S = 0{,}5$ мм^2

$U = 0{,}034$ В

$\rho = 0{,}017 \dfrac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Знайти:

I — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Відповідно до закону Ома: $I = \dfrac{U}{R} \Rightarrow R = \dfrac{U}{I}$.

Опір дроту визначимо за формулою $R = \dfrac{\rho l}{S}$.

Отже, маємо:

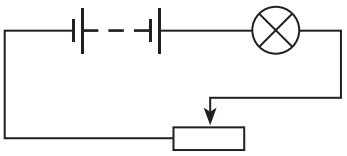
$$\frac{U}{I} = \frac{\rho l}{S} \Rightarrow US = I\rho l \Rightarrow I = \frac{US}{\rho l}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{\text{В} \cdot \text{мм}^2}{\dfrac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В} \cdot \text{мм}^2}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} = \frac{\text{В}}{\dfrac{\text{В}}{\text{А}}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}; \quad I = \frac{0{,}034 \cdot 0{,}5}{0{,}017 \cdot 10} = 0{,}1 \text{ (А)}.$$

Відповідь: $I = 0{,}1$ А.

Задача 2. На рисунку зображено схему електричного кола, яке складається з джерела струму, електричної лампи та реостата. Як зміниться сила струму в лампі, якщо повзунок реостата пересунути праворуч?



Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Якщо пересунути повзунок реостата праворуч, то довжина обмотки, в якій тече струм, збільшиться $(l \uparrow)$. Опір реостата теж збільшиться $(R_{\text{реост}} \uparrow)$. Відповідно збільшиться і загальний опір ділянки кола $(R \uparrow)$.

За законом Ома $I = \dfrac{U}{R}$. Напруга на ділянці кола не змінюється ($U = \text{const}$), а опір ділянки збільшиться, тому сила струму в ділянці, а отже, і в лампі, зменшиться $(I \downarrow)$.

Відповідь: сила струму в лампі зменшиться.

Підбиваємо підсумки

Опір R провідника прямо пропорційний його довжині l, обернено пропорційний площі S його поперечного перерізу й залежить від речовини, з якої виготовлений провідник: $R = \rho \dfrac{l}{S}$, де ρ — питомий опір речовини.

Питомий опір речовини — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості даної речовини й чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника завдовжки 1 м і площею поперечного перерізу 1 м^2.

Для регулювання сили струму в колі застосовують реостати — пристрої, опір яких можна змінювати. На практиці застосовують повзункові, важільні (секційні) та інші реостати.

Контрольні запитання

1. Доведіть, що провідник чинить опір електричному струмові. **2.** Як довести, що опір провідника прямо пропорційний його довжині? **3.** Чи залежить опір провідника від площі його поперечного перерізу? Якщо залежить, то як? **4.** За якою формулою обчислюють опір провідника? **5.** Що таке питомий опір речовини? **6.** Якими властивостями речовини визначається можливість її використання для виготовлення електропроводки? **7.** Що таке реостат? **8.** Які типи реостатів ви знаєте? Чим вони відрізняються? **9.** Опишіть будову та принцип дії повзункового реостата. **10.** Як позначають повзунковий реостат на схемі?

Вправа № 30

1. На рис. 1 зображено провідники, що мають однакову площу поперечного перерізу, але виготовлені з різних речовин (заліза, міді, свинцю). Визначте, з якої речовини виготовлений кожний провідник, якщо відомо, що їхні опори однакові.

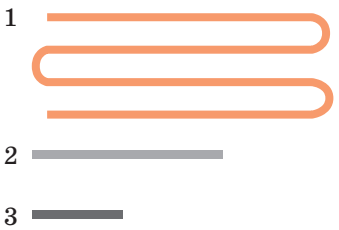


Рис. 1

2. Обчисліть опір мідного дроту завдовжки 2 м, якщо площа його поперечного перерізу становить 6,8 мм^2.

3. Як зміняться опір реостата і сила струму в колі (рис. 2), якщо повзунок реостата пересунути праворуч?

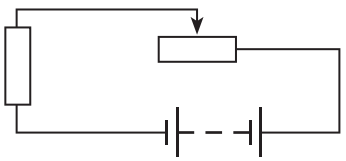


Рис. 2

4. Яким має бути завдовжки ніхромовий дріт із площею поперечного перерізу 0,2 мм^2, щоб за напруги на його кінцях 4,4 В сила струму в ньому становила 0,4 А?

5. Дріт, що має опір 25 Ом, розрізали навпіл і половини звили. Як і в скільки разів змінився опір дроту? Поясніть свою відповідь.

6. Під час проходження електричного струму в алюмінієвому дроті завдовжки 100 м напруга на кінцях дроту становить 7 В. Чому дорівнює маса дроту, якщо сила струму в ньому 10 А?

7. Скориставшись рис. 3, опишіть принцип дії штепсельного реостата.

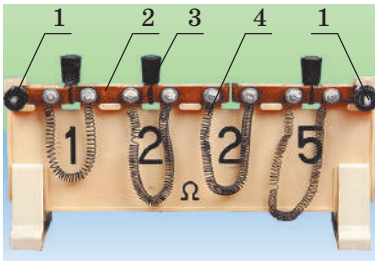


Рис. 3. Штепсельний реостат (магазин опорів):
1 — затискачі;
2 — мідна пластина;
3 — штепсель; 4 — спіраль

Експериментальне завдання

Виготовте з металевого дроту резистор, що має опір 0,2 Ом. Опишіть свої дії. Зазначте діаметр і довжину використаного дроту, метал, з якого він виготовлений.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тема. Вимірювання опору провідника за допомогою амперметра та вольтметра.

Мета: навчитися визначати опір провідника за допомогою амперметра та вольтметра; переконатися на досліді в тому, що опір провідника не залежить від сили струму в ньому та напруги на його кінцях.

Обладнання: джерело струму, резистор, повзунковий реостат, амперметр, вольтметр, ключ, з'єднувальні проводи.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Підготовка до експерименту

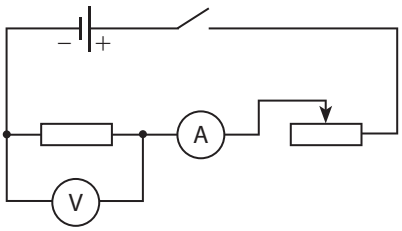
1. Перш ніж виконувати роботу, переконайтеся, що ви знаєте:
   1) вимоги безпеки під час роботи з електричними колами;
   2) правила, яких необхідно дотримуватися, здійснюючи вимірювання за допомогою амперметра та вольтметра.
2. Визначте ціну поділки шкал амперметра та вольтметра.

Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Складіть електричне коло за поданою схемою.



2. Розташуйте повзунок реостата на середині обмотки.
3. Замкніть коло і виміряйте напругу на резисторі та силу струму в ньому.
4. Плавно пересуваючи повзунок реостата, збільшіть силу струму в резисторі. Запишіть покази вольтметра та амперметра.
5. Пересуваючи повзунок реостата у протилежний бік, ще двічі виміряйте напругу на резисторі та силу струму в ньому.

Опрацювання результатів експерименту

1. Обчисліть опір резистора для кожного випадку.
2. Результати обчислень занесіть до таблиці.

Номер досліду	Сила струму I, A	Напруга U, B	Опір R, Ом
1			

Аналіз експерименту та його результатів

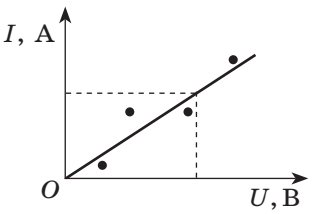
Проаналізувавши експеримент та його результати, зробіть висновок, у якому зазначте:

1) яку фізичну величину і за допомогою яких приладів ви навчилися вимірювати;
2) чи залежить вимірювана величина від сили струму в резисторі та напруги на ньому;
3) які чинники вплинули на точність вимірювання.

Творче завдання

За отриманими в ході експерименту даними побудуйте графік — вольт-амперну характеристику резистора. За графіком визначте значення опору резистора.

Зверніть увагу: через похибку вимірювання точки можуть не належати одній прямій, що проходить через початок координат ($U=0$, $I=0$). У цьому випадку будуйте графік так, щоб він проходив через точку (0, 0) і щоб з обох боків від графіка була приблизно однакова кількість експериментальних точок. Для знаходження опору резистора використайте будь-яку точку отриманого графіка (див. рисунок).



Завдання «із зірочкою»

Вважаючи, що абсолютні похибки вимірювання сили струму та напруги дорівнюють ціні поділки шкали відповідного приладу, визначте для досліду 1:

1) відносну похибку вимірювання сили струму: $\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I}$;
2) відносну похибку вимірювання напруги: $\varepsilon_I = \frac{\Delta U}{U}$;
3) відносну похибку вимірювання опору: $\varepsilon_R = \varepsilon_I + \varepsilon_U$;
4) абсолютну похибку вимірювання опору: $\Delta R = \varepsilon_R \cdot R$.

§ 31. ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

Уявіть плеєр без кнопки «ввімкнути/вимкнути», тобто такий, який можна, наприклад, вимкнути, тільки витягнувши з його корпусу акумулятор. Дуже незручно, правда? Але відсутність вимикача — це тільки незручності в користуванні, а от неправильне підключення вимикача до електричного кола може призвести до серйозних наслідків (плеєр може вийти з ладу). Про те, як потрібно підключати вимикачі до пристроїв та приладів і які особливості має таке з'єднання, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 Вивчаємо характерні властивості кола, яке складається з послідовно з'єднаних провідників

Електричне коло, подане на рис. 31.1, не має розгалужень: елементи кола розташовані послідовно один за одним. Таке з'єднання провідників називають *послідовним*. З послідовним з'єднанням ви вже зустрічалися (див. рис. 26.3, 27.6), а тепер розглянемо його детальніше.

Зверніть увагу: якщо один із послідовно з'єднаних провідників вийде з ладу, то в решті струм теж іти не буде, бо *коло буде розімкненим*.

Оскільки коло з послідовним з'єднанням провідників не має розгалужень, то заряд, який за певний час t проходить через поперечний переріз кожного з провідників, є однаковим:

$$q = q_1 = q_2 ,$$

де q — загальний заряд, який пройшов через коло; q_1 — заряд, який пройшов через поперечний переріз спіралі резистора; q_2 — заряд, який пройшов через поперечний переріз нитки розжарення лампи.

Поділивши цей вираз на t, отримаємо: $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t}$.

За означенням сили струму: $\frac{q}{t} = I$, отже, маємо: $I = I_1 = I_2$.

У разі послідовного з'єднання провідників загальна сила струму в колі та сила струму в кожному провіднику однакові:

$$I = I_1 = I_2$$

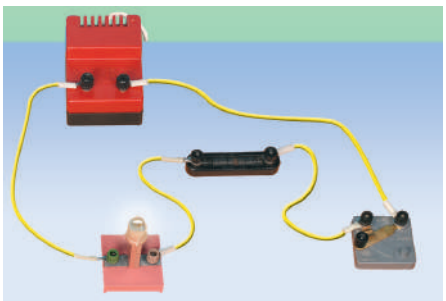


Рис. 31.1. Послідовне з'єднання кількох провідників

Наші теоретичні дослідження легко перевірити за допомогою експерименту (рис. 31.2).

Щоб з'ясувати, яким співвідношенням пов'язані загальна напруга U на двох послідовно з'єднаних провідниках та напруги U_1 і U_2 на першому та другому провідниках відповідно, згадаємо формулу для обчислення напруги:

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

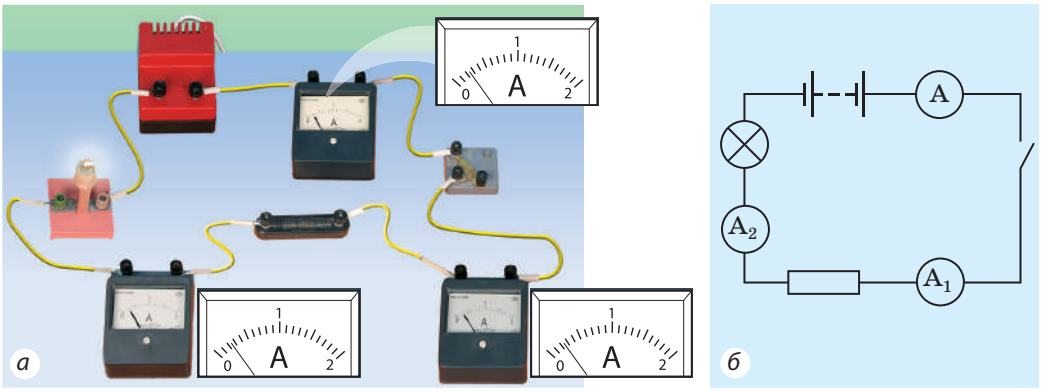


Рис. 31.2. Вимірювання сили струму в різних ділянках електричного кола, яке складене з послідовно з'єднаних провідників: *а* — загальний вигляд електричного кола; *б* — схема. Сила струму в усіх провідниках однакова

Якщо електричне поле виконує роботу A_1 з переміщення заряду q в першому провіднику і роботу A_2 — у другому провіднику, то зрозуміло, що для переміщення заряду через обидва провідники має бути виконана робота $A = A_1 + A_2$. Поділивши обидві частини рівності на q, одержимо: $\frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q}$. За означенням напруги $\frac{A}{q} = U$, отже, $U = U_1 + U_2$.

Загальна напруга U на двох послідовно з'єднаних провідниках дорівнює сумі напруги U_1 на першому провіднику та напруги U_2 на другому провіднику:

$$U = U_1 + U_2$$

Одержаний висновок можна перевірити експериментально (рис. 31.3).

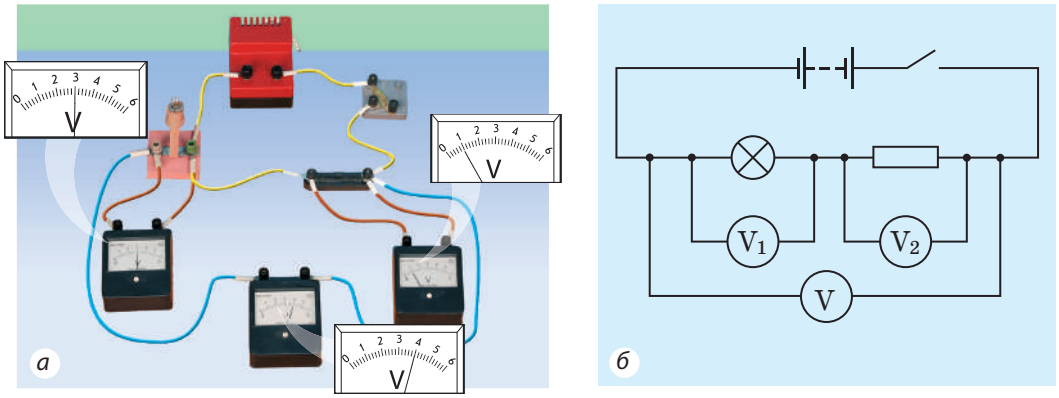


Рис. 31.3. Вимірювання напруги на різних ділянках електричного кола, яке складене з послідовно з'єднаних провідників: *а* — загальний вигляд електричного кола; *б* — схема. Загальна напруга на ділянці кола, яка містить послідовно з'єднані лампу та резистор, дорівнює сумі напруги на лампі та напруги на резисторі

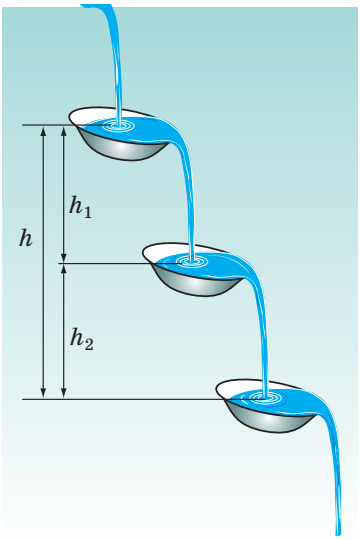


Рис. 31.4. Механічна модель послідовного з'єднання провідників

Одержані співвідношення для сили струму та напруги справджуються для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників:

$$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n;$$

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n,$$

де n — кількість провідників.

Щоб краще зрозуміти властивості послідовного з'єднання провідників, скористайтеся механічною аналогією (рис. 31.4); відповідні паралелі проведіть самостійно.

2 Виводимо формулу для розрахунку опору

Для обчислення загального опору R ділянки кола, яка складається з двох послідовно з'єднаних провідників опорами R_1 і R_2, скористаємося співвідношенням $U = U_1 + U_2$.

Застосувавши закон Ома, можемо переписати це співвідношення так:

$$IR = I_1R_1 + I_2R_2.$$

Оскільки в разі послідовного з'єднання $I_1 = I_2 = I$, то одержимо: $IR = IR_1 + IR_2$, або $IR = I(R_1 + R_2)$. Після скорочення на I остаточно маємо:

$$R = R_1 + R_2$$

Якщо ділянка кола складається з кількох послідовно з'єднаних провідників, загальний опір ділянки дорівнює сумі опорів окремих провідників:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n,$$

де n — кількість провідників.

Проаналізувавши останню формулу, можна зробити такі висновки:

— загальний опір послідовно з'єднаних провідників більший за опір кожного із цих провідників;

— загальний опір послідовно з'єднаних провідників, які мають однаковий опір, можна розрахувати за формулою:

$$R = n \cdot R_0,$$

де n — кількість провідників; R_0 — опір кожного провідника.

3 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Три резистори з опорами 2 Ом, 3 Ом і 7 Ом з'єднані послідовно. Яким є опір цієї ділянки кола? Визначте напругу на кожному резисторі та силу струму в ділянці, якщо на ділянку подано напругу 36 В. Опором проводів знехтуйте.

Аналіз фізичної проблеми. В умові задачі подано опір кожного резистора, тому можемо знайти загальний опір ділянки кола. Скориставшись законом Ома, знайдемо силу струму в колі. Знаючи, що сила струму в ділянці кола, яка складається з послідовно з'єднаних провідників, всюди однакова, обчислимо напругу на кожному резисторі.

Дано:

$R_1 = 2$ Ом

$R_2 = 3$ Ом

$R_3 = 7$ Ом

$U = 36$ В

Знайти:

R — ?

U_1 — ?

U_2 — ?

U_3 — ?

I — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

$R = R_1 + R_2 + R_3 = 2\text{ Ом} + 3\text{ Ом} + 7\text{ Ом} = 12\text{ Ом}.$

Відповідно до закону Ома: $I = \frac{U}{R} = \frac{36\text{ В}}{12\text{ Ом}} = 3\text{ А}.$

$I_1 = I_2 = I_3 = I$, тому $I_1 = 3\text{ А}$; $I_2 = 3\text{ А}$; $I_3 = 3\text{ А}$.

$U_1 = I_1 R_1 = 3\text{ А} \cdot 2\text{ Ом} = 6\text{ В}$; $U_2 = I_2 R_2 = 3\text{ А} \cdot 3\text{ Ом} = 9\text{ В}$;

$U_3 = I_3 R_3 = 3\text{ А} \cdot 7\text{ Ом} = 21\text{ В}.$

Аналіз результатів. Загальна напруга на ділянці кола: $U = U_1 + U_2 + U_3 = 6\text{ В} + 9\text{ В} + 21\text{ В} = 36\text{ В}$. Одержаний результат збігається зі значенням напруги, поданим в умові задачі, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $R = 12$ Ом; $U_1 = 6$ В; $U_2 = 9$ В; $U_3 = 21$ В; $I = 3$ А.

Підбиваємо підсумки

Електричне коло, яке складається з послідовно з'єднаних провідників, не має розгалужень. Провідники приєднуються до кола послідовно, один за одним. Вимкнення одного зі споживачів приведе до розмикання кола.

Якщо ділянка кола складається з n послідовно з'єднаних провідників, то справджуються такі співвідношення:

— сила струму в усій ділянці кола та в кожному провіднику однакова: $I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$;

— загальна напруга на всій ділянці кола дорівнює сумі напруг на окремих провідниках: $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$;

— загальний опір ділянки кола є більшим за опір кожного провідника та обчислюється за формулою $R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$.

— загальний опір ділянки кола, яка складається з послідовно з'єднаних провідників однакового опору, можна розрахувати за формулою $R = n \cdot R_0$, де R — загальний опір ділянки; R_0 — опір кожного з n провідників.

Контрольні запитання

1. Яку особливість має електричне коло, що складається з послідовно з'єднаних провідників? **2.** Поясніть, чому вимикач завжди з'єднують зі споживачем послідовно. **3.** Ділянка кола складається з послідовно з'єднаних провідників. Яким є співвідношення між загальною силою струму в ділянці та силою струму в кожному провіднику? між загальною напругою на ділянці та напругою на кожному провіднику? **4.** Як обчислити загальний опір кола, яке складається з послідовно з'єднаних провідників? **5.** Як зміниться загальний опір ділянки кола, якщо до неї послідовно приєднати ще один провідник?

Вправа № 31

Виконуючи завдання, опором проводів знехтуйте.

1. Ділянка кола містить два послідовно з'єднаних резистори з опором 2 Ом кожен. Який опір ділянки? Яку напругу подано на ділянку, якщо сила струму в ній 0,5 А? Якою є напруга на кожному резисторі?

2. Загальний опір двох ламп і реостата, з'єднаних послідовно, дорівнює 65 Ом. Накресліть електричну схему цієї ділянки кола. Визначте опір реостата, якщо опір кожної лампи дорівнює 15 Ом.

3. Ділянка кола (рис. 1) містить дві послідовно з'єднані електричні лампи, опір яких становить: $R_1 = 120$ Ом; $R_2 = 130$ Ом. Яким є показ вольтметра, якщо напруга на ділянці дорівнює 100 В?

4. Опір одного з двох послідовно з'єднаних резисторів становить 650 Ом. Знайдіть опір іншого резистора, якщо сила струму в ньому 80 мА, а загальна напруга на обох резисторах дорівнює 72 В.

5. Ділянка кола (рис. 2) містить три резистори, опір яких становить: $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 15$ Ом. Яким є показ амперметра і чому дорівнює напруга між точками A і B, якщо вольтметр показує 1,6 В?

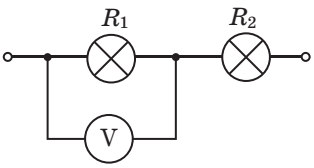


Рис. 1

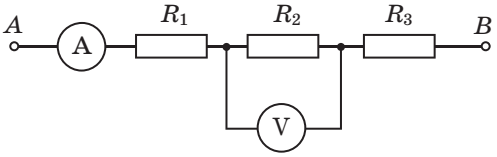


Рис. 2

6. Чи можна лампу для кишенькового ліхтарика, яка розрахована на силу струму 0,3 А, увімкнути в освітлювальну мережу послідовно з лампою, яка розрахована на напругу 220 В і має опір 1100 Ом? Поясніть свою відповідь.

7. Будь-який вольтметр розрахований на вимірювання напруги, що не перевищує певної межі. Але якщо до вольтметра послідовно приєднати певний *додатковий опір* ($R_д$) — резистор (рис. 3), то межа вимірювання вольтметра збільшиться. Це відбувається тому, що вимірювана напруга U ділиться на дві частини: одна частина (U_V) припадає на вольтметр, а друга ($U_д$) — на резистор: $U = U_V + U_д$.

Визначте, резистор якого опору необхідно послідовно приєднати до шкільного вольтметра опором 900 Ом, щоб збільшити межу його вимірювання в 5 разів. (Наприклад, вольтметр показує 6 В, а напруга на нагрівачі 30 В.) Поміркуйте, де вам можуть знадобитися вміння, набуті під час розв'язування цієї задачі.

8. Кубик масою 240 г упав з полиці шафи спочатку на стіл, а потім на підлогу (рис. 4). Як змінювалась енергія кубика в ході падіння? Яку роботу виконала сила тяжіння на кожному етапі падіння? за весь час падіння?

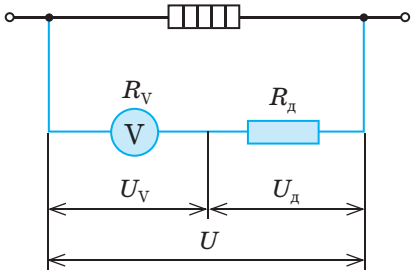


Рис. 3

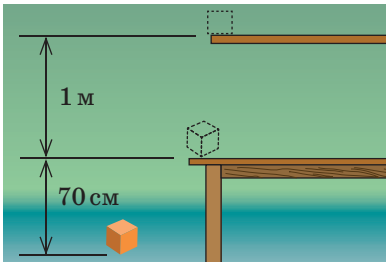


Рис. 4

Експериментальне завдання

Виготовте пристрій, призначений для перевірки знань (рис. 5). Для цього виконайте такі дії.

1. На аркуш цупкого картону наклейте у два стовпчики 10–16 прямокутних смужок із паперу.
2. На смужках, розташованих у лівому стовпчику, напишіть запитання.
3. На смужках у правому стовпчику напишіть відповіді, причому так, щоб пара «запитання — правильна відповідь» не становила один рядок.
4. Поряд із кожним прямокутником вставте в картон кнопку з довгим вістрям.
5. За допомогою проводів з'єднайте кнопки на звороті картону так, щоб утворилися пари «запитання — правильна відповідь» (рис. 6), та складіть електричне коло.
6. Перевірте знання своїх однокласників, попросивши їх торкнутися вільними кінцями проводів до клеми із запитанням і клеми з відповіддю. Якщо відповідь правильна, то лампа має засвітитися.

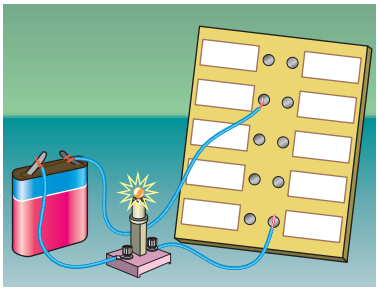


Рис. 5

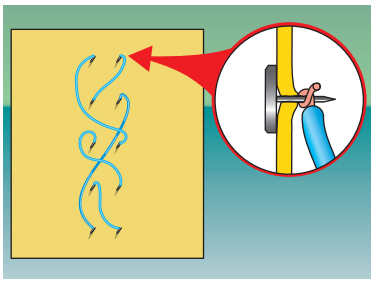


Рис. 6

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Тема. Дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням провідників.

Мета: експериментально перевірити, що в разі послідовного з'єднання двох провідників справджуються співвідношення: $I = I_1 = I_2$; $U = U_1 + U_2$; $R = R_1 + R_2$.

Обладнання: джерело струму, вольтметр, амперметр, ключ, два резистори, з'єднувальні проводи.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Підготовка до експерименту

1. Перш ніж виконувати роботу, переконайтеся, що ви знаєте вимоги безпеки під час роботи з електричними колами.
2. Накресліть схему електричного кола, яке складається із джерела струму, двох резисторів і ключа, з'єднаних послідовно.
3. Складіть і запишіть план проведення експерименту. Якщо вагаєтеся, то скористайтеся планом, наведеним нижче.

Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Дослід 1. Порівняння сили струму в різних ділянках кола, яке містить тільки послідовне з'єднання провідників.

1. Складіть електричне коло за накресленою вами схемою.
2. Виміряйте силу струму, увімкнувши амперметр спочатку між джерелом струму і першим резистором (I_1), потім між ключем і другим резистором (I_2), а потім між ключем і джерелом струму (I). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.
3. Результати вимірювань занесіть до табл. 1 і зробіть висновок.

Таблиця 1

I_1, А	I_2, А	I, А	Висновок

Дослід 2. Порівняння загальної напруги на ділянці кола, яка складається з послідовно з'єднаних резисторів, і суми напруг на окремих резисторах.

1. У колі, складеному для проведення досліду 1, виміряйте напругу спочатку на першому резисторі (U_1), потім на другому резисторі (U_2), а потім на обох резисторах (U). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

2. Результати вимірювань занесіть до табл. 2. Закінчіть заповнення таблиці та зробіть висновок.

Таблиця 2

U_1, В	U_2, В	U, В	(U_1+U_2), В	Висновок

Опрацювання результатів експерименту

1. Використовуючи результати дослідів 1 і 2, обчисліть опір першого резистора (R_1), другого резистора (R_2) та опір ділянки кола, яка містить обидва резистори (R).

2. Результати обчислень занесіть до табл. 3. Закінчіть заповнення таблиці, зробіть висновок.

Таблиця 3

R_1, Ом	R_2, Ом	R, Ом	(R_1+R_2), Ом	Висновок

Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізувавши експеримент і його результати, зробіть висновок, у якому зазначте:

1) які співвідношення для послідовно з'єднаних провідників ви перевіряли та які результати одержали;
2) які чинники могли вплинути на точність отриманих вами результатів.

Творче завдання

Запишіть план проведення експерименту, за допомогою якого можна визначити опір резистора, якщо ви маєте вольтметр, джерело струму, резистор відомого опору та з'єднувальні проводи. Проведіть відповідний експеримент.

Завдання «із зірочкою»

Вважаючи, що абсолютна похибка вимірювання напруги дорівнює ціні поділки шкали вольтметра, визначте для досліду 2:

1) відносну похибку вимірювання напруги на першому резисторі: $\varepsilon_{U_1} = \frac{\Delta U}{U_1}$;
2) відносну похибку вимірювання загальної напруги: $\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U}$;
3) відносну похибку експерименту: $\varepsilon = \left|1 - \frac{U_1 + U_2}{U}\right| \cdot 100\,\%$.

§ 32. ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

На практиці до електричного кола часто доводиться приєднувати відразу кілька споживачів. Так, електричне коло освітлення шкільного кабінету обов'язково містить декілька ламп, і при цьому вихід із ладу однієї лампи не приведе до відключення решти. Фізики в такому випадку кажуть, що лампи з'єднані паралельно. А як обчислити силу струму, напругу та опір за умови паралельного з'єднання провідників?

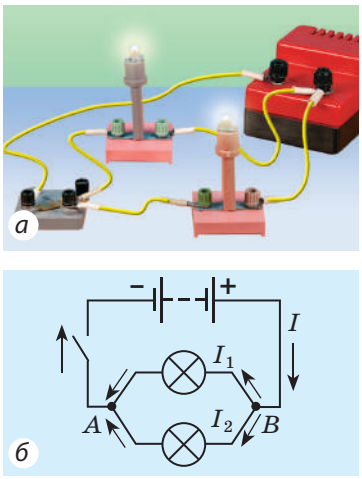


Рис. 32.1. Паралельне з'єднання кількох споживачів струму: *а* — загальний вигляд; *б* — схема; стрілками показано напрямок струму

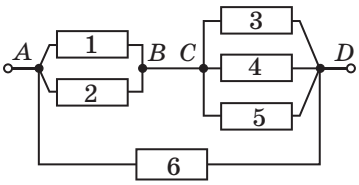


Рис. 32.2. Схема ділянки кола, яка містить паралельне з'єднання провідників. З'єднані паралельно: резистори 1 і 2 (вузли *A* і *B*), резистори 3, 4 і 5 (вузли *C* і *D*); резистор 6 приєднаний паралельно ділянці *AD* (вузли *A* і *D*)

1 Вивчаємо коло, яке містить паралельно з'єднані провідники

Розглянемо електричне коло, яке містить дві паралельно з'єднані лампи (рис. 32.1, *а*). Звернувшись до схеми цього кола (рис. 32.1, *б*), бачимо: по-перше, для проходження струму в колі є два шляхи — дві *вітки*, кожна з яких містить одну лампу; по-друге, обидві вітки мають спільну пару точок — *A* і *B*. Такі точки називають *вузловими точками (вузлами)**. У вузлових точках відбувається розгалуження кола. *Розгалуження є характерною ознакою кола з паралельним з'єднанням провідників.*

Схема кола може містити не одну, а кілька пар вузлових точок. При цьому всі провідники, які приєднані до певної пари вузлових точок, вважаються з'єднаними *паралельно* (рис. 32.2).

2 З'ясовуємо, як розрахувати силу струму та напругу в разі паралельного з'єднання провідників

Щоб визначити напругу на кожному з паралельно з'єднаних провідників, достатньо виміряти напругу між вузловими точками. Так, приєднавши вольтметр до пари вузлових точок *A* і *B* (рис. 32.3), одразу вимірюємо напругу і на ділянці *AB*, і на кожній лампі.

Загальна напруга на ділянці та напруга на кожному з паралельно з'єднаних провідників є однаковою:

$$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n,$$

де n — кількість провідників.

* *Вузловою точкою (вузлом)* на електричній схемі кола називають таку точку, у якій з'єднуються не менш ніж три проводи.

Уже зазначалося, що в разі паралельного з'єднання провідників є кілька шляхів для проходження струму (див. рис. 32.1, *б*). Дійсно, струм, дійшовши до розгалуження (вузлова точка B), розтікається по двох вітках. Оскільки заряд у вузловій точці не накопичується, то заряд q, який «надійшов» у вузол за певний час t, дорівнює сумі зарядів $(q_1 + q_2)$, які «вийшли» із цього вузла за той самий час: $q = q_1 + q_2$. Поділивши обидві частини рівності на t, одержимо: $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}$. Оскільки $\frac{q}{t} = I$, маємо:

$$I = I_1 + I_2$$

Це співвідношення справджується для будь-якої кількості паралельно з'єднаних провідників.

У разі паралельного з'єднання провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках):

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n,$$

де n — кількість провідників.

Це твердження можна довести експериментально, підключивши в електричне коло, зображене на рис. 32.1, три амперметри: один (A) у нерозгалужену частину кола, а два інші (A_1 і A_2) — у кожне відгалуження (рис. 32.4).

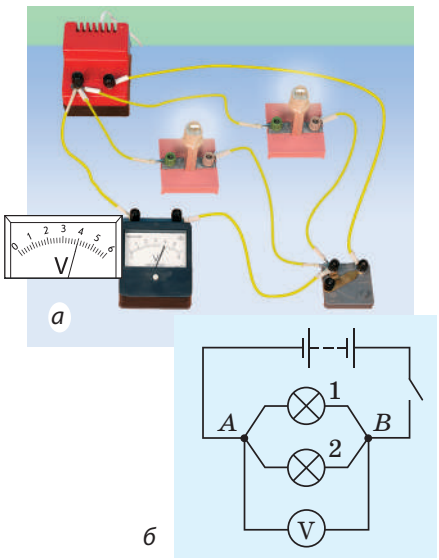


Рис. 32.3. Вимірювання напруги в разі паралельного з'єднання провідників: *а* — загальний вигляд; *б* — схема. Вольтметр показує напругу на лампі 1, лампі 2 і на всій ділянці *AB*

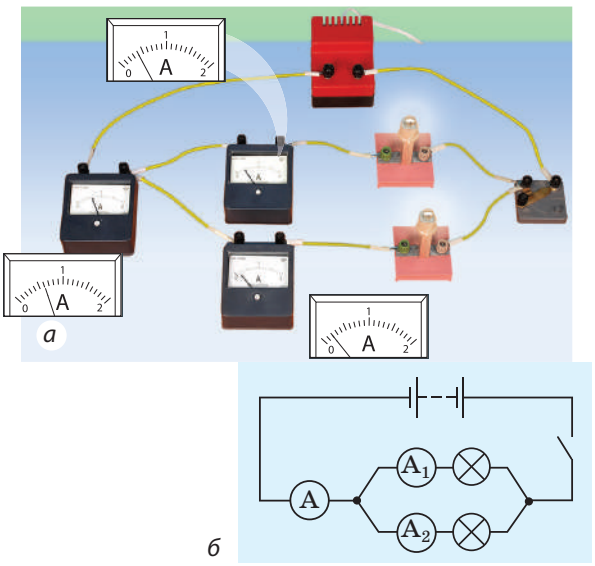


Рис. 32.4. Вимірювання сили струму в разі паралельного з'єднання провідників: сила струму в нерозгалуженій ділянці кола, яка вимірюється амперметром A, дорівнює сумі сил струмів, які вимірюються в кожній вітці розгалуження амперметрами A_1 і A_2

Зверніть увагу: якщо одна з паралельно з'єднаних ламп вийде з ладу, то інша продовжить світитися, оскільки через її нитку розжарення все одно буде проходити струм.

А чи зможете ви тепер пояснити, чому споживачі електричної енергії у вашій оселі з'єднані паралельно?

3 Виводимо формулу для розрахунку загального опору ділянки кола з паралельним з'єднанням провідників

Щоб обчислити загальний опір R ділянки кола AB (див. рис. 32.1), яка складається з двох паралельно з'єднаних ламп, скористаємося співвідношенням:

$$I = I_1 + I_2.$$

Позначивши опори ламп як R_1 і R_2 та застосувавши закон Ома, можемо переписати це співвідношення у вигляді: $\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}$.

Оскільки в разі паралельного з'єднання провідників $U_1 = U_2 = U$, одержимо: $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$. Після скорочення на U остаточно маємо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

З останнього виразу отримуємо формулу для розрахунку опору ділянки кола, яка складається із двох паралельно з'єднаних провідників:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

У загальному випадку опір R ділянки кола, яка складається з n паралельно з'єднаних провідників, можна обчислити, скориставшись формулою:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

Проаналізувавши останню формулу, зробимо такі висновки:

— загальний опір провідників, з'єднаних паралельно, менший за опір кожного із цих провідників;

— загальний опір паралельно з'єднаних провідників, які мають однаковий опір, можна розрахувати за формулою:

$$R = \frac{R_0}{n},$$

де R_0 — опір кожного провідника; n — кількість провідників.

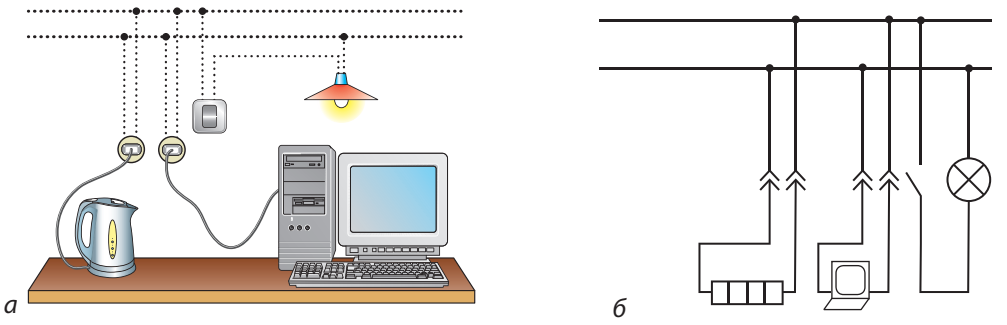


Рис. 32.5. Частина електричної проводки у квартирі: *а* — загальний вигляд; *б* — схематичне зображення. На практиці електропроводку монтують у стінах

Знайдіть опір ділянки кола, яка містить п'ять провідників опором 15 кОм кожний, якщо провідники з'єднані: паралельно; послідовно. Якою є сила струму в кожному провіднику, якщо на ділянку подано напругу 300 В?

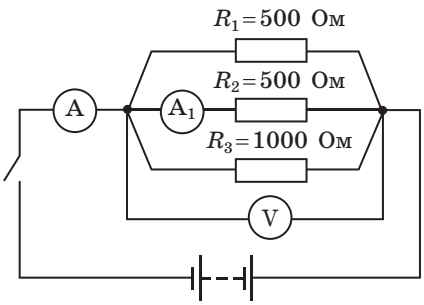
4 Дізнаємося про деякі важливі факти

Сподіваємось, що ви правильно відповіли на запитання в пункті 2 цього параграфа і дійшли ось якого висновку. Різноманітні побутові електричні пристрої вмикають в електричну мережу паралельно, оскільки: 1) тільки в разі такого підключення на кожному пристрої буде та напруга, на яку він розрахований, а саме 220 В; 2) вимкнення одного зі споживачів не приведе до відключення решти.

На рис. 32.5 зображено частину електричної проводки у квартирі. Горизонтальні лінії — проводи електромережі. Ці вмонтовані в стіни проводи охоплюють усю квартиру. Напруга між проводами становить 220 В.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. На рисунку наведено схему електричного кола. Визначте покази амперметрів, якщо показ вольтметра 12 В. Опори резисторів зазначено на рисунку.



Аналіз фізичної проблеми. Наведена схема електричного кола має два розгалуження, отже, коло містить паралельне з'єднання провідників.

Амперметр А ввімкнений перед розгалуженням, а амперметр A_1 — у відгалуження, яке містить резистор 2. Таким чином, необхідно знайти загальну силу струму в колі та силу струму в резисторі 2. Значення шуканих величин визначимо, скориставшись законом Ома та формулами для розрахунку сили струму й напруги в разі паралельного з'єднання провідників.

Дано:
$U = 12$ В
$R_1 = 500$ Ом
$R_2 = 500$ Ом
$R_3 = 1000$ Ом

Знайти:
I — ?
I_2 — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

У разі паралельного з'єднання провідників $U_1 = U_2 = U_3 = U$, тому $U_1 = 12$ В; $U_2 = 12$ В; $U_3 = 12$ В.

Відповідно до закону Ома: $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{12\text{ В}}{500\text{ Ом}} = 0{,}024$ А;

$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{12\text{ В}}{500\text{ Ом}} = 0{,}024$ А; $I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{12\text{ В}}{1000\text{ Ом}} = 0{,}012$ А.

Сила струму в нерозгалуженій частині кола:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 0{,}024\text{ А} + 0{,}024\text{ А} + 0{,}012\text{ А} = 0{,}06\text{ А}.$$

Аналіз результатів. Із закону Ома загальний опір кола:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12\text{ В}}{0{,}06\text{ А}} = \frac{1200\text{ В}}{6\text{ А}} = 200\ \text{Ом}.$$

У разі паралельного з'єднання провідників:

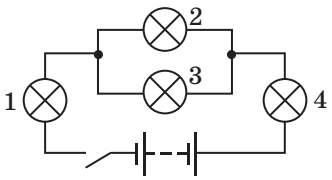
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{500\text{ Ом}} + \frac{1}{500\text{ Ом}} + \frac{1}{1000\text{ Ом}} = \frac{5}{1000\text{ Ом}}.$$

Звідси $R = \frac{1000\text{ Ом}}{5} = 200\ \text{Ом}$.

Результати збіглися, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: показ амперметра А — 60 мА; показ амперметра A_1 — 24 мА.

Задача 2. Чотири однакові лампи з'єднані так, як показано на рисунку, і підключені до джерела постійної напруги. Визначте силу струму в кожній лампі, якщо напруга на джерелі 30 В, а опір кожної лампи — 6 Ом.



Аналіз фізичної проблеми. Коло містить **змішане з'єднання провідників:** лампи 2 і 3 з'єднані паралельно; лампи 1 і 4 — послідовно з ділянкою кола, що складається з ламп 2 і 3. Скориставшись законом Ома й співвідношеннями для сили струму, напруги та опору для послідовного і для паралельного з'єднань провідників, знайдемо значення шуканих величин.

Дано:
$U = 30$ В
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 6$ Ом

Знайти:
I_1 — ? I_2 — ?
I_3 — ? I_4 — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Лампи 2 і 3 з'єднані паралельно і мають однаковий опір, тому $R_{2,3} = \frac{R_2}{2} = \frac{6\text{ Ом}}{2} = 3$ Ом. Загальний опір кола:

$$R = R_1 + R_{2,3} + R_4 = 6\text{ Ом} + 3\text{ Ом} + 6\text{ Ом} = 15\text{ Ом}.$$

За законом Ома загальна сила струму:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30\text{ В}}{15\text{ Ом}} = 2\text{ А}.$$

Оскільки $I_1 = I_{2,3} = I_4 = I$, то $I_1 = 2\text{ А}$; $I_{2,3} = 2\text{ А}$; $I_4 = 2\text{ А}$.

$U_{2,3} = I_{2,3}R_{2,3} = 2\text{ А} \cdot 3\text{ Ом} = 6\text{ В}$. $U_2 = U_3 = U_{2,3} \Rightarrow U_2 = 6\text{ В}$; $U_3 = 6\text{ В}$.

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{6\text{ В}}{6\text{ Ом}} = 1\text{ А}; \quad I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{6\text{ В}}{6\text{ Ом}} = 1\text{ А}.$$

Аналіз результатів. З одного боку, загальна сила струму на ділянці, що складається з ламп 2 і 3, дорівнює 2 А, з іншого боку, $I_{2,3} = I_2 + I_3 = 1\text{ А} + 1\text{ А} = 2\text{ А}$. Результати збіглися, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $I_1 = I_4 = 2\text{А}$; $I_2 = I_3 = 1\text{А}$.

Зверніть увагу: у випадку розрахунку *складних кіл зі змішаним з'єднанням провідників* зручно *покроково спрощувати схему*. Так, у задачі 2 таке покрокове спрощення матиме вигляд, поданий на рис. 32.6, *а*. Покрокове спрощення більш складної схеми подано на рис. 32.6, *б*.

Підбиваємо підсумки

Ділянка кола, яка складається з паралельно з'єднаних провідників, обов'язково має розгалуження. Провідники вважаються з'єднаними паралельно, якщо вони приєднані до пари вузлових точок.

Вимкнення одного з паралельно з'єднаних провідників практично не впливає на роботу решти.

Якщо ділянка кола складається з n провідників, з'єднаних тільки паралельно, то справджуються такі твердження:

— напруга на кожному провіднику і на всій ділянці є однаковою: $U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$;

— сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях: $I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$;

— загальний опір ділянки кола можна обчислити, скориставшись формулою $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$.

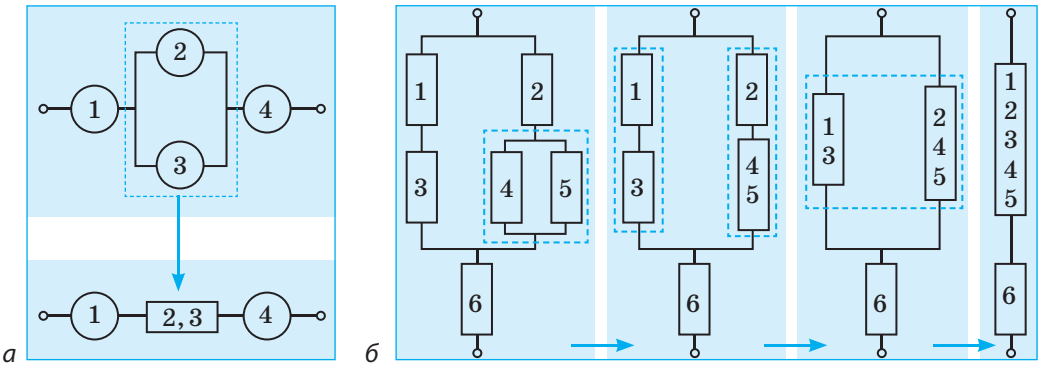


Рис. 32.6. Приклади покрокового спрощення електричної схеми в ході розв'язування задач на змішане з'єднання провідників

Контрольні запитання

1. Назвіть характерну ознаку кола, яке містить паралельне з'єднання провідників. **2.** Порівняйте напругу на ділянці кола, яка складається з паралельно з'єднаних провідників, і напруги на кожному провіднику. **3.** Яким є співвідношення між силою струму в нерозгалуженій частині кола і силою струму в кожній вітці розгалуження? **4.** За допомогою якої формули можна обчислити опір ділянки кола, яка складається з кількох паралельно з'єднаних провідників? **5.** Чому споживачі електроенергії у вашій оселі з'єднано паралельно?

Вправа № 32

1. Електричне коло складається з акумулятора та трьох з'єднаних паралельно електричних ламп. Накресліть схему цього кола.

2. На рис. 1 зображено схему ділянки електричного кола. Відомо, що опір R_1 становить 100 Ом, опір R_2 — 150 Ом, показ амперметра — 2,4 А. Визначте напругу на ділянці.

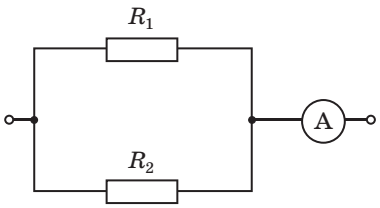


Рис. 1

3. Дві електричні лампи з'єднали паралельно й приєднали до джерела струму, напруга на якому становить 120 В. Визначте силу струму в кожній лампі й у нерозгалуженій частині кола, якщо опір однієї лампи дорівнює 200 Ом, а іншої — 300 Ом.

4. Однакові за довжиною та поперечним перерізом дроти — залізний, мідний і срібний — з'єднали паралельно та підключили до джерела струму. У якому дроті сила струму буде найбільшою?

5. Визначте загальний опір ділянки кола, зображеної на рис. 32.6, *б*, якщо $R_1 = R_6 = 7$ Ом; $R_2 = 1$ Ом; $R_3 = 5$ Ом; $R_4 = 12$ Ом; $R_5 = 4$ Ом. Якою буде загальна сила струму в ділянці кола, якщо до неї прикласти напругу 4 В?

6. Чому дорівнює напруга на полюсах джерела струму, яке живить коло (рис. 2), якщо $R_1 = 3$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 8$ Ом? Показ амперметра — 0,1 А.

7. Опір усіх резисторів на ділянці електричного кола (рис. 3) є однаковим і дорівнює 5 Ом. До ділянки кола прикладено постійну напругу. Який ключ потрібно замкнути, щоб показ амперметра A_2 був нижчим від показу амперметра A_1? Яке значення сили струму буде показувати амперметр A_1, якщо замкнути тільки ключ K_1? Відомо, що амперметр A_2 показує 300 мА, якщо всі ключі розімкнені.

8. Ви маєте 4 резистори з опором R_0 кожний. Скільки різних опорів і які саме ви можете отримати, використовуючи всі резистори одночасно?

9. Щоб виміряти силу струму, більшу за ту, на яку розрахований амперметр, можна скористатися тим самим амперметром: паралельно амперметру слід під'єднати резистор — *шунт* (рис. 4).

У разі застосування шунта струм ділиться на дві частини: одна йде через амперметр, а інша — через шунт: $I = I_{\text{А}} + I_{\text{ш}}$.

Шунт якого опору слід під'єднати паралельно амперметру опором 0,07 Ом, щоб збільшити межу вимірювання амперетра від 2 до 10 А?

10. Складіть задачу за рис. 32.2 і розв'яжіть її.

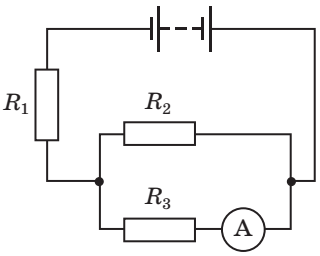


Рис. 2

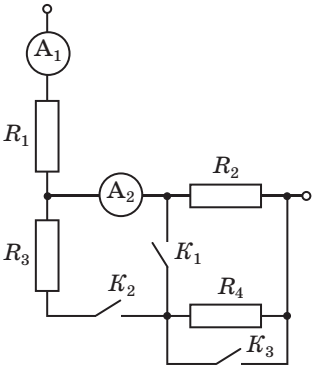


Рис. 3

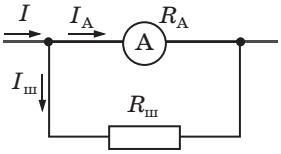


Рис. 4

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Тема. Дослідження електричного кола з паралельним з'єднанням провідників.

Мета: експериментально перевірити, що сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях; довести, що загальний опір провідників, з'єднаних паралельно, менший за опір кожного з них.

Обладнання: джерело струму, вольтметр, амперметр, ключ, дві електричні лампи на підставках, з'єднувальні проводи.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Підготовка до експерименту

1. Перш ніж виконувати роботу, переконайтеся, що ви знаєте вимоги безпеки під час роботи з електричними колами.

2. Накресліть схему електричного кола, яке складається з двох паралельно з'єднаних ламп, що через ключ з'єднані з джерелом струму.

3. Складіть і запишіть план проведення експерименту. Якщо вагаєтеся, скористайтеся наведеним планом.

Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).
Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Складіть електричне коло за накресленою вами схемою.
2. Під'єднавши амперметр до відповідної ділянки кола, виміряйте силу струму I, який проходить у нерозгалуженій частині кола, потім силу струму I_1, який тече в лампі 1, і силу струму I_2, який тече в лампі 2.
3. Виміряйте напругу U на лампах.
4. Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

Опрацювання результатів експерименту

Використавши результати вимірювань, обчисліть опір R_1 нитки розжарення лампи 1; опір R_2 нитки розжарення лампи 2; опір R ділянки кола, яка містить обидві лампи. Результати обчислень занесіть до таблиці.

I, А	I_1, А	I_2, А	U, В	R_1, Ом	R_2, Ом	R, Ом

Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізувавши експеримент і його результати, зробіть висновок, у якому зазначте:

1) які співвідношення для паралельно з'єднаних провідників ви перевіряли та які результати отримали;
2) які чинники могли вплинути на точність отриманих результатів.

Творче завдання

Запишіть план проведення експерименту, за допомогою якого можна визначити опір резистора, якщо наявні амперметр, джерело струму, резистор відомого опору та з'єднувальні проводи. Проведіть відповідний експеримент.

Завдання «із зірочкою»

Вважаючи, що під час виконання лабораторної роботи абсолютна похибка вимірювання сили струму дорівнювала ціні поділки шкали амперметра, визначте:

1) відносну похибку вимірювання сили струму в лампі 1: $\varepsilon_{I_1} = \dfrac{\Delta I}{I_1}$;
2) відносну похибку вимірювання загальної сили струму: $\varepsilon_I = \dfrac{\Delta I}{I}$;
3) відносну похибку експерименту: $\varepsilon = \left|1 - \dfrac{I_1 + I_2}{I}\right| \cdot 100\,\%$.

ЧАСТИНА 2. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

§ 33. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Кожен із вас бачив електролічильник, а дехто навіть знімав його покази. А як ви гадаєте, яку фізичну величину вимірює цей прилад? Щоб перевірити свої припущення, ознайомтеся зі змістом цього параграфа.

1 З'ясовуємо, значення якої фізичної величини визначають за допомогою електролічильника

На рис. 33.1 показано *електролічильник*. Запам'ятаємо або запишемо цифри, зафіксовані на датчику приладу (рис. 33.1, *а*), інакше кажучи, *знімемо показ лічильника*. Що означають ці цифри? Очевидно, що це числове значення якоїсь фізичної величини. А якої?

Для початку визначимо одиниці цієї величини. Поряд із цифровим табло написано: кВт · год. Отже, фізична величина, значення якої показує електролічильник, вимірюється в кіловат-годинах. Відомо, що $1\,\text{кВт} = 1000\,\text{Вт}$ і $1\,\text{год} = 3600\,\text{с}$, а $1\,\text{Вт} = 1\,\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$. Таким чином, $1\,\text{кВт} \cdot \text{год} = 1000\,\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 3600\,\text{с} = 3\,600\,000\,\text{Дж}$, або $1\,\text{кВт} \cdot \text{год} = 3{,}6 \cdot 10^6\,\text{Дж}$. Одна із фізичних величин, що вимірюються в джоулях, — це робота. Отже, можна припустити, що електролічильником вимірюють *роботу струму*. Приєднаємо до кола електролічильника електрообігрівач. Через деякий час знову знімемо показ лічильника (рис. 33.1, *б*). Бачимо, що він збільшився. Електричний струм,

Рис. 33.1. Зняття показів лічильника: *а* — початкові дані (382 кВт · год); *б* — дані лічильника після деякого часу роботи електрообігрівача (385 кВт · год). Кількість використаної за цей час електроенергії: 385 – 382 = 3 (кВт · год)

проходячи спіраллю електрообігрівача, виконав роботу, яку зафіксував електролічильник.

Електролічильник — це прилад для прямого вимірювання роботи струму.

(Установлену вартість одиниці роботи струму називають тарифом на електроенергію. Наприклад, на 1 січня 2021 р. тариф на електроенергію для населення в Україні становив 1,68 грн за 1 кВт · год.)

2 Обчислюємо роботу струму

З'ясуємо, чи можна роботу струму виміряти в інший спосіб, не використовуючи електролічильник.

Із § 28 ви дізналися, що електрична напруга U на кінцях ділянки електричного кола визначається за формулою $U = \frac{A}{q}$. Отже, роботу A електричного струму з переміщення електричного заряду q на певній ділянці кола можна знайти за формулою $A = Uq$. Подавши заряд q через силу струму I та час t його проходження: $q = It$, — отримаємо *формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола*:

$$A = UIt$$

Таким чином, щоб визначити роботу, яку виконує струм у певному споживачі (на певній ділянці електричного кола), достатньо виміряти силу струму в споживачі, напругу, яку подано на споживач, і час проходження струму (рис. 33.2). Ви вже знаєте, що такі вимірювання називають *непрямими*.

Скориставшись рис. 33.2, виміряйте роботу електричного струму в лампі за 30 с.

Зверніть увагу: із формули для розрахунку роботи електричного струму випливає, що $1\,\text{Дж} = 1\,\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$, — це співвідношення стане вам у пригоді для перевірки одиниць у ході розв'язування задач.

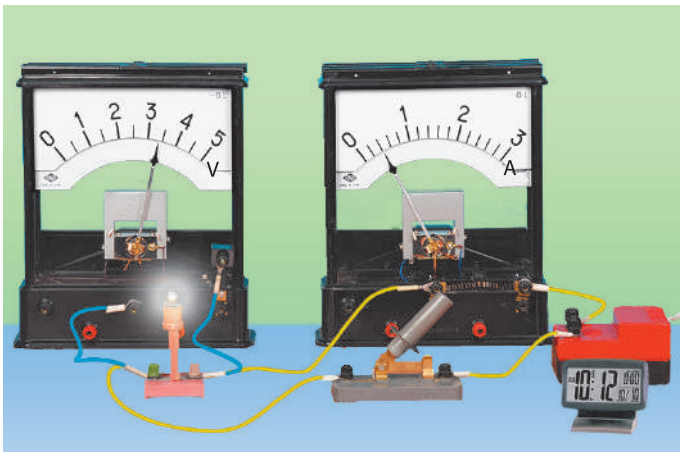


Рис. 33.2. Для вимірювання роботи струму можна скористатися добре відомими вам вимірювальними приладами: амперметром, вольтметром і годинником

3 Обчислюємо потужність струму

Потужність електричного струму — фізична величина, що характеризує швидкість виконання струмом роботи й дорівнює відношенню роботи струму до часу, за який цю роботу виконано:

$$P = \frac{A}{t},$$

де P — потужність електричного струму; A — робота струму за час t.

Оскільки $A = UIt$, то

$$P = UI$$

Одиниця потужності в СІ — **ват**: $1\ \text{Вт} = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Із формули для розрахунку потужності струму випливає: $1\ \text{Вт} = 1\ \text{В} \cdot \text{А}$;

1 Вт — *це потужність струму силою* 1 А *на ділянці кола з напругою* 1 В.

Ват — порівняно невелика одиниця потужності. На практиці частіше використовують кратні одиниці потужності: *кіловат* ($1\ \text{кВт} = 10^3\ \text{Вт}$), *мегават* ($1\ \text{МВт} = 10^6\ \text{Вт}$), *гігават* ($1\ \text{ГВт} = 10^9\ \text{Вт}$).

4 Учимося розрізняти номінальну і фактичну потужності

Звернувшись до формули розрахунку потужності струму ($P = UI$), побачимо, що потужність струму можна визначити, скориставшись амперметром і вольтметром (знявши покази приладів, перемножити значення напруги та сили струму). Існують також прилади для *прямого вимірювання* потужності електричного струму — *ватметри*.

Вимірюючи потужність струму в споживачі, ми визначаємо його **фактичну потужність**. Потужність, яку зазначено в паспорті електропристрою (або на пристрої), називають **номінальною потужністю**.

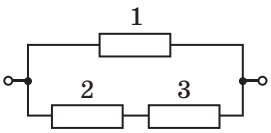
У паспорті електропристрою зазначають також напругу, на яку пристрій розрахований. Проте напруга в мережі може трохи змінюватися. Наприклад, вона може збільшитися — відповідно збільшиться й сила струму. Збільшення сили струму й напруги приведе до збільшення потужності струму в споживачі. Тобто *значення фактичної та номінальної потужностей споживача можуть відрізнятися*.

Якщо коло складається з кількох споживачів, то, розраховуючи їхню фактичну потужність, слід пам'ятати, що *за будь-якого з'єднання споживачів загальна потужність струму в усьому колі дорівнює сумі потужностей окремих споживачів*.

Завершуючи знайомство з потужністю електричного струму, знову звернемося до рис. 33.1. На лічильнику є значення ще двох фізичних величин: 220 В; 15 А. Перша показує, в коло з якою напругою слід вмикати цей лічильник, друга — максимально допустиму силу струму в ньому. Перемноживши ці значення, одержимо *максимально допустиму потужність споживачів, які можна підключити через цей електролічильник* ($UI = P_{\max}$).

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. Ділянка електричного кола складається з трьох однакових резисторів (див. рисунок). Визначте загальну потужність, яку споживають резистори, якщо опір кожного з них дорівнює 5 Ом, а напруга на ділянці становить 10 В.



Аналіз фізичної проблеми. Розв'язати задачу можна двома способами:

1) обчислити потужність, яку споживає кожний резистор, а потім знайти суму одержаних потужностей;

2) визначити загальну силу струму в ділянці й, знаючи загальну напругу, обчислити загальну потужність усіх резисторів.

Дано:
$R_1 = R_2 = R_3 = 5$ Ом
$U = 10$ В

Знайти:
P — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Спосіб 1

Ділянка кола, яка містить резистори 2 і 3, з'єднана з резистором 1 паралельно, тому $U_1 = U_{2,3} = U = 10$ В.

За законом Ома $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{10\text{ В}}{5\text{ Ом}} = 2\text{ А}$.

Відповідно до формули для розрахунку потужності:

$$P_1 = U_1 I_1 = 10\text{ В} \cdot 2\text{ А} = 20\text{ Вт}.$$

Оскільки резистори 2 і 3 з'єднані послідовно, то

$$R_{2,3} = R_2 + R_3 = 5\text{ Ом} + 5\text{ Ом} = 10\text{ Ом};\quad I_2 = I_3 = I_{2,3} = \frac{U_{2,3}}{R_{2,3}} = \frac{10\text{ В}}{10\text{ Ом}} = 1\text{ А}.$$

Використавши закон Ома, знайдемо напругу на резисторах 2 і 3 та обчислимо потужності, які вони споживають:

$$U_2 = I_2 R_2 = 1\text{ А} \cdot 5\text{ Ом} = 5\text{ В},\quad P_2 = U_2 I_2 = 5\text{ В} \cdot 1\text{ А} = 5\text{ Вт};$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 1\text{ А} \cdot 5\text{ Ом} = 5\text{ В},\quad P_3 = U_3 I_3 = 5\text{ В} \cdot 1\text{ А} = 5\text{ Вт}.$$

Таким чином, $P = P_1 + P_2 + P_3 = 20\text{ Вт} + 5\text{ Вт} + 5\text{ Вт} = 30\text{ Вт}$.

Спосіб 2

Спочатку знайдемо загальний опір R ділянки кола.

Резистори *2* і *3* з'єднані послідовно, тому:

$$R_{2,3} = R_2 + R_3 = 5\text{ Ом} + 5\text{ Ом} = 10\text{ Ом}.$$

Ділянка кола, яка містить резистори 2 і 3, з'єднана з резистором 1 паралельно, отже:

$$R = \frac{R_{2,3} \cdot R_1}{R_{2,3} + R_1} = \frac{10\text{ Ом} \cdot 5\text{ Ом}}{15\text{ Ом}} = \frac{10}{3}\text{ Ом}.$$

За законом Ома $I = \frac{U}{R} = 10\text{ В} : \frac{10}{3}\text{ Ом} = 3\text{ А}$. Відповідно до формули для розрахунку потужності: $P = UI = 10\text{ В} \cdot 3\text{ А} = 30\text{ Вт}$.

Аналіз результату. Розв'язуючи задачу різними способами, одержали однакове значення потужності, отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $P = 30$ Вт.

Задача 2. Електровоз рухається рівномірно зі швидкістю $16\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Двигун розвиває силу тяги 300 кН. Визначте ККД двигуна, якщо напруга в електромережі 3 кВ, сила струму, яку споживає двигун, — 2 кА.

Аналіз фізичної проблеми. ККД показує, яку частину роботи, виконуваної струмом, що тече в обмотці електродвигуна, становить корисна робота (механічна робота з переміщення електровоза). ККД знайдемо, використавши формулу для розрахунку механічної роботи і роботи струму.

Дано:

$v = 16\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$F = 3 \cdot 10^5$ Н

$U = 3 \cdot 10^3$ В

$I = 2 \cdot 10^3$ А

Знайти:

η — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За означенням ККД $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$.

$A_{\text{кор}} = Fl$ — механічна робота з переміщення електровоза на відстань l.

Електровоз рухається рівномірно, тому $l = vt$.

Таким чином, $A_{\text{кор}} = Fvt$.

Робота струму у двигуні електровоза: $A_{\text{повна}} = UIt$.

Підставивши вирази для $A_{\text{кор}}$ і $A_{\text{повна}}$ у формулу для розрахунку ККД, одержимо:

$$\eta = \frac{Fvt}{UIt} = \frac{Fv}{UI}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[\eta] = \frac{\text{Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{В} \cdot \text{А}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = 1; \quad \eta = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 16}{3 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0{,}8.$$

Аналіз результату. ККД дорівнює 80 % — для електричних двигунів результат реальний.

Відповідь: $\eta = 80\,\%$.

Підбиваємо підсумки

На ділянці кола електричний струм виконує роботу, значення якої дорівнює добуткові напруги U, сили струму I і часу t проходження струму в колі: $A = UIt$.

Одиницею роботи електричного струму в СІ є джоуль (Дж): $1\,\text{Дж} = 1\,\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$. В електротехніці використовують позасистемну одиницю роботи струму — кіловат-годину (кВт · год); $1\,\text{кВт} \cdot \text{год} = 3{,}6 \cdot 10^6$ Дж.

Прилади для прямого вимірювання роботи струму називають лічильниками електричної енергії.

Фізичну величину, яка характеризує швидкість виконання струмом роботи, називають потужністю електричного струму. Потужність електричного струму обчислюють за формулою $P = UI$. Одиниця потужності електричного струму в СІ — ват (Вт): $1\,\text{Вт} = 1\,\frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1\,\text{В} \cdot \text{А}$.

Потужність, на яку розрахований електричний пристрій, називають номінальною потужністю. Зазвичай номінальну потужність зазначають у паспорті електричного пристрою. Реальну потужність струму в пристрої називають фактичною потужністю.

Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу електричного струму? **2.** Назвіть відомі вам одиниці роботи електричного струму. **3.** Доведіть, що 1 кВт·год = $3{,}6 \cdot 10^6$ Дж. **4.** Як вимірюють роботу електричного струму? **5.** Що називають потужністю електричного струму? **6.** За якою формулою можна обчислити потужність струму? **7.** Що називають номінальною потужністю електричного пристрою? **8.** Що таке фактична потужність електричного пристрою?

Вправа № 33

1. Користуючись показами електролічильника (див. рисунок), визначте витрачену електроенергію та обчисліть її вартість за тарифом 1,68 грн за 1 кВт·год.

2. Згідно з Державним стандартом якості електричної енергії в Україні, зміна номінальної напруги в оселях не повинна перевищувати ±10 % від напруги 220 В. У яких межах має бути напруга у вашій оселі?

3. Доведіть, що 1 В·А·с = 1 Дж.

4. Обчисліть роботу, яку виконає електричний струм за 15 хв роботи електродвигуна дитячої іграшки, якщо напруга на двигуні становить 10 В, а сила струму в обмотці двигуна — 0,8 А.

5. Два провідники опорами 10 і 25 Ом увімкнено до мережі, напруга в якій дорівнює 100 В. Визначте, яку роботу виконає електричний струм у кожному провіднику за 5 хв, якщо провідники з'єднати: а) паралельно; б) послідовно.

6. Визначте силу струму, яку споживає електродвигун підіймального крана, якщо вантаж масою 1 т кран підіймає на висоту 19 м за 50 с. ККД електродвигуна становить 80 %, напруга на клемах — 380 В.

7. Дві електропечі, спіралі яких мають однакові опори, спочатку ввімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електропечі споживали більшу потужність і в скільки разів?

8. З'ясуйте потужність кількох споживачів електроенергії у вашій оселі. Обчисліть вартість електроенергії, яку споживатиме кожний пристрій, якщо працюватиме 20 хв. Перенесіть таблицю до зошита та заповніть її.

Пристрій	Потужність P, Вт	Робота струму A		Вартість, грн
		Дж	кВт·год	

9. Установіть відповідність між фізичною ситуацією та формулою, яка її описує.

1 Працює тепловий двигун.

2 У бойлері нагрівається вода.

3 Калюжа вкрилася льодом.

4 Із колодязя підняли відро з водою.

А $A = mgh$

Б $Q = cm\Delta t$

В $E_k = \frac{mv^2}{2}$

Г $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}$

Д $Q = \lambda m$

Експериментальне завдання

«*Сумлінний господар*». Протягом тижня спостерігайте за споживанням електроенергії у вашій оселі. Для цього щодня, в той самий час, слід записувати показ лічильника електроенергії та обчислювати, скільки електроенергії спожила ваша родина за добу.

За результатами вимірювань та обчислень побудуйте графік споживання електроенергії протягом тижня. Дайте відповіді на такі запитання.

1) У який день тижня витрати електроенергії були найбільшими? Чому?
2) Чи були ввімкнені споживачі електроенергії без потреби?
3) Як можна заощадити витрати електроенергії вашою родиною?
4) Як заощадила б (або заощаджує) кошти ваша родина, використовуючи двозонний лічильник електроенергії? (Такі лічильники рахують споживання електроенергії вдень і вночі окремо.)

Фізика і техніка в Україні

Інститут термоелектрики НАН України і МОН України (Чернівці) створений у 1990 р. Організатор створення інституту — академік НАН України *Лук'ян Іванович Анатичук*, учений у галузі термоелектрики та технології матеріалів для перетворювачів енергії.

Інститут є світовим лідером у галузі вивчення та практичного застосування термоелектрики — одного з найбільш перспективних напрямів сучасної фізики.

На основі розвитку узагальненої теорії термоелектричного перетворення енергії в інституті створено низку нових термоелементів. Розробки інституту використовують не тільки в Україні, а й за кордоном. Так, інститут узяв участь у розробці потужних кондиціонерів для підводних човнів Франції. Створено надійні модулі охолодження для європейської космічної системи мікрогравітації та модулі охолодження чутливих сенсорів для систем орієнтації європейських супутників Землі. Розроблено ефективні блоки для побутових холодильників як альтернативу фреоновим компресорним агрегатам.

Інститут є базою для кафедри термоелектрики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

§ 34. ТЕПЛОВА ДІЯ СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Із власного досвіду вам добре відомо, що під час проходження електричного струму нитка лампи розжарення нагрівається настільки, що починає випромінювати видиме світло. Завдяки дії електричного струму нагріваються праска й електрична плита. А от вентилятор і пилосос нагріваються незначно, так само не стають дуже гарячими (звичайно, якщо все гаразд) і підвідні проводи. Про те, від чого залежить теплова дія струму, ви дізнаєтеся, опрацювавши матеріал цього параграфа.

1 Розмірковуємо про теплову дію струму

Уже йшлося про те, що проходження струму завжди супроводжується виділенням теплоти. Цей факт неважко пояснити.

Коли в провіднику йде струм, то вільні заряджені частинки, рухаючись під дією електричного поля, зіштовхуються з іншими частинками і передають їм частину своєї енергії. Електрони в металах зіштовхуються з йонами, розташованими у вузлах кристалічної ґратки, йони в електролітах — з іншими йонами, атомами або молекулами. У результаті середня швидкість хаотичного (теплового) руху частинок речовини збільшується — провідник нагрівається. Це означає, що кінетична енергія, набута вільними зарядженими частинками в результаті дії електричного поля, частково перетворилася на внутрішню енергію провідника.

Очевидно: чим частіше зіштовхуються частинки, тобто чим більший опір провідника, тим більше енергії передається провіднику і тим більше він нагрівається. Таким чином, *за незмінної сили струму в провіднику кількість теплоти, яка виділяється в ньому під час проходження струму, прямо пропорційна опору провідника*.

Крім того, *зі збільшенням у провіднику сили струму кількість теплоти, що виділяється, теж збільшується*. Адже чим більше частинок проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу, тим більше зіткнень частинок відбувається.

2 Дізнаємося про закон Джоуля — Ленца

Теплову дію струму вивчали на дослідах англійський учений *Дж. Джоуль* (рис. 34.1) і російський учений німецького походження *Е. Х. Ленц* (рис. 34.2). Незалежно один від одного вони дійшли однакового висновку, який згодом отримав назву **закон Джоуля — Ленца:**

Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику внаслідок проходження струму, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника й часу проходження струму:

$$Q = I^2Rt$$

На рис. 34.3 зображено схему досліду, який доводить закон Джоуля — Ленца. Спробуйте описати цей дослід самостійно.

Закон Джоуля — Ленца був установлений експериментально. Тепер, знаючи формулу для розрахунку роботи струму ($A = UIt$), цей закон можна вивести за допомогою простих математичних викладень.

Якщо на ділянці кола, в якій тече струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, результатом роботи електричного струму буде тільки нагрівання провідника. Нагрітий провідник шляхом теплопередачі віддає отриману енергію навколишнім тілам. Отже, у цьому випадку згідно із законом збереження енергії кількість виділеної теплоти Q дорівнюватиме роботі A струму: $Q = A$.

Оскільки $A = UIt$, а $U = IR$, маємо:

$$Q = UIt = IRIt = I^2Rt.$$

Рис. 34.1. Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) — англійський фізик, один із засновників сучасної теорії теплових явищ. У 1841 р. установив залежність кількості теплоти, яка виділяється в провіднику зі струмом, від сили струму та опору провідника

3 Звертаємо увагу на деякі особливості обчислення кількості теплоти

Для одержання математичного виразу закону Джоуля — Ленца ми скористалися деякими припущеннями. Дослідження показали, що *в будь-якому випадку кількість теплоти, яка виділяється в ділянці кола внаслідок проходження струму, можна обчислити за формулою* $Q = I^2Rt$.

Виникає запитання: що робити, якщо сила струму невідома, а відомою є напруга на кінцях ділянки кола? Здавалося б, можна скористатися законом Ома. Справді, $Q = I^2Rt$, а $I = \frac{U}{R}$. Тоді $Q = \left(\frac{U}{R}\right)^2 Rt = \frac{U^2}{R^2}Rt$.

Рис. 34.2. Емілій Християнович Ленц (1804–1865) — російський фізик німецького походження, професор Петербурзького університету. Незалежно від Дж. Джоуля в 1842 р. встановив закон теплової дії електричного струму

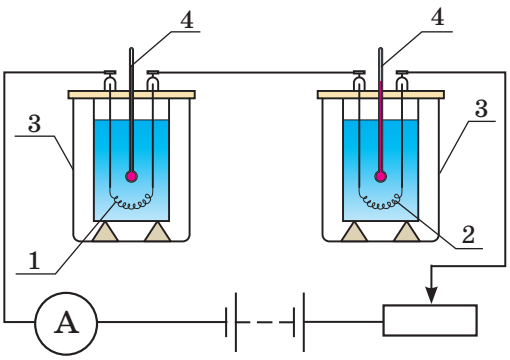


Рис. 34.3. Схема досліду, який доводить закон Джоуля — Ленца: 1, 2 — електричні нагрівники (опір нагрівника 1 більший за опір нагрівника 2); 3 — калориметри з однаковою кількістю води; 4 — термометри

Після скорочення на R одержимо:

$$Q=\frac{U^2}{R}t.$$

Однак цією формулою, втім як і формулою $Q=UIt$, ***можна користуватися*** *тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія витрачається на нагрівання.*

Якщо ж на ділянці кола є споживачі енергії, в яких виконується механічна робота або відбуваються хімічні реакції, формулами $Q=\frac{U^2}{R}t$ *і* $Q=UIt$ ***користуватися не можна.*** У таких випадках застосовують більш складні математичні вирази, які враховують усю сукупність явищ.

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Визначте опір нагрівника, за допомогою якого можна за 5 хв довести до кипіння 1,5 кг води, взятої за температури 12 °С. Напруга в мережі дорівнює 220 В, ККД нагрівника — 84 %.

Аналіз фізичної проблеми. Коли в нагрівнику проходить електричний струм, виділяється кількість теплоти $Q_{\text{повна}}$. Частина її $(Q_{\text{кор}})$ витрачається на нагрівання води до кипіння, тобто до 100 °С.

Подавши $Q_{\text{повна}}$ і $Q_{\text{кор}}$ через зазначені в умові задачі величини, знайдемо шукану величину. Значення питомої теплоємності c води знайдемо у відповідній таблиці (див. табл. 1 *Додатка*).

Дано:
$\tau=5$ хв $=300$ с
$m=1{,}5$ кг
$t_1=12$ °С
$t_2=100$ °С
$U=220$ В
$\eta=84\ \%=0{,}84$
$c=4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°С}}$

Знайти:
R — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За означенням ККД нагрівника маємо: $\eta=\frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}$.

Тут $Q_{\text{кор}}=cm(t_2-t_1)$; $Q_{\text{повна}}=\frac{U^2\cdot\tau}{R}$.

Підставимо вирази для $Q_{\text{кор}}$ і $Q_{\text{повна}}$ у формулу ККД:

$$\eta=\frac{cm(t_2-t_1)}{\frac{U^2\cdot\tau}{R}},\ \text{або}\ \eta=\frac{cm(t_2-t_1)\cdot R}{U^2\cdot\tau}.$$

З останнього виразу знайдемо R:

$$\eta U^2\cdot\tau=cm(t_2-t_1)\cdot R\ \Rightarrow\ R=\frac{\eta U^2\cdot\tau}{cm(t_2-t_1)}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[R]=\frac{\text{В}^2\cdot\text{с}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°С}}\cdot\text{кг}\cdot\text{°С}}=\frac{\text{В}^2\cdot\text{с}}{\text{Дж}}=\frac{\text{В}^2\cdot\text{с}}{\text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с}}=\frac{\text{В}}{\text{А}}=\text{Ом};$$

$$R=\frac{0{,}84\cdot220^2\cdot300}{4200\cdot1{,}5\cdot(100-12)}=\frac{84\cdot220\cdot220\cdot3}{420\cdot15\cdot88}=22\ (\text{Ом}).$$

Відповідь: $R=22$ Ом.

Підбиваємо підсумки

Проходження струму в провіднику супроводжується виділенням теплоти. Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику внаслідок проходження струму, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму: $Q = I^2Rt$ (закон Джоуля — Ленца).

Існують ще дві формули для розрахунку кількості теплоти: $Q = \frac{U^2t}{R}$ і $Q = UIt$, — однак цими формулами можна користуватися тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія йде на нагрівання.

Контрольні запитання

1. Чому нагріваються провідники, в яких тече електричний струм? **2.** Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву? **3.** Як математично записують закон Джоуля — Ленца? **4.** Які формули для розрахунку кількості теплоти, що виділяється в провіднику внаслідок проходження струму, ви знаєте? Чи завжди можна ними користуватися?

Вправа № 34

1. Скільки теплоти виділиться за 10 хв в електропечі, якщо опір нагрівального елемента печі становить 30 Ом, а сила струму в ньому дорівнює 4 А?

2. Два провідники опорами 10 і 20 Ом увімкнуті в мережу, що має напругу 100 В. Яка кількість теплоти виділиться за 5 с у кожному провіднику, якщо вони з'єднані паралельно?

3. Чому електричні проводи, якими подається напруга до електричної лампи розжарення, не нагріваються, а нитка розжарення лампи нагрівається та яскраво світиться?

4. Електрокип'ятильник, в обмотці якого тече струм силою 2 А, за 5 хв нагріває 0,2 кг води від 14 °С до кипіння. Визначте напругу, подану на електрокип'ятильник. Втратами енергії знехтуйте.

5. У кожний із двох калориметрів налили 200 г води за температури 20 °С. У перший калориметр помістили нагрівач опором 24 Ом, у другий — опором 12 Ом. Нагрівачі з'єднали послідовно і підключили до джерела струму (див. рис. 34.3). Якою буде температура води в кожному калориметрі, якщо нагрівання триватиме 7 хв, а сила струму в колі весь час буде незмінною і становитиме 1,5 А? Втратами енергії знехтуйте.

6. Якої довжини ніхромовий дріт треба взяти, щоб виготовити електричний камін, який працюватиме за напруги 120 В і виділятиме 1 МДж теплоти за годину? Діаметр дроту 0,5 мм.

7. Порівняйте кількості теплоти, які необхідно витратити, щоб розплавити мідний і свинцевий дроти, якщо ці дроти мають однакову масу й узяті за температури 27 °С.

§ 35. ЕЛЕКТРИЧНІ НАГРІВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ. ЗАПОБІЖНИКИ

Статистичні дані свідчать про те, що серед причин виникнення пожеж друге місце після необережного поводження з вогнем посідає загоряння проводки внаслідок короткого замикання. Про те, що таке коротке замикання і як убезпечитися від загорян-ня проводів, якщо замикання все ж таки відбулося, ви дізнаєтеся із цього параграфа.

Рис. 35.1. Щоб збільшити тепловіддачу, поверхню обігрівача роблять ребристою, а нагрівальну поверхню електроплити виготовляють із темних металів

Рис. 35.2. Основна частина будь-якого електричного нагрівального пристрою — нагрівальний елемент

1 Вивчаємо електронагрівальні пристрої

Електричні нагрівальні пристрої широко застосовують у сільському господарстві, промисловості, на транспорті, в побуті.

Пропонуємо вам самостійно навести приклади застосування електричних нагрівальних пристроїв у різних галузях.

Незважаючи на зовнішнє різноманіття, усі електронагрівники, використовувані на практиці, мають спільні риси.

По-перше, робота всіх електричних нагрівників *ґрунтується на тепловій дії струму:* в таких пристроях енергія електричного струму перетворюється на внутрішню енергію нагрівника, який, у свою чергу, віддає енергію довкіллю шляхом теплопередачі (рис. 35.1).

По-друге, основною частиною будь-якого електронагрівника є *нагрівальний елемент* — провідник, який нагрівається в разі проходження струму (рис. 35.2). Нагрівальні елементи мають витримувати дуже високу температуру, тому їх *виготовляють із тугоплавких матеріалів, тобто з матеріалів, які мають високу температуру плавлення* (рис. 35.3). Щоб уникнути ураження струмом, нагрівальний елемент *ізолюють від корпусу нагрівального пристрою.*

За законом Джоуля — Ленца кількість теплоти Q, що виділяється в нагрівальному елементі, обчислюється за формулою $Q = I^2Rt$, отже, змінюючи час нагрівання або силу струму в нагрівальному елементі, можна *регулювати температуру нагрівника* (рис. 35.4).

Підвідні проводи та нагрівальний елемент з'єднані послідовно, тому сила струму в них є однаковою. При цьому підвідні

проводи нагріваються набагато менше, ніж нагрівальний елемент. Це означає, що опір підвідних проводів у багато разів менший від опору нагрівального елемента. Зазвичай *нагрівальні елементи виготовляють із речовин з великим питомим опором, а підвідні проводи — із речовин з малим питомим опором*.

Рис. 35.3. Нагрівальний елемент електричної лампи розжарення виготовляють із вольфраму, температура плавлення якого 3387 °С. Нагріваючись до температури 3000 °С, тонка вольфрамова нитка починає яскраво світитися

2 З'ясовуємо причини різкого збільшення сили струму в колі

Опір підвідних проводів досить малий, проте в разі значного збільшення сили струму вони дуже нагріваються, і це може стати причиною пожежі.

З'ясуємо, з яких причин може різко збільшитися сила струму в електричному колі звичайної квартири. Для цього згадаємо закон Ома: $I = \frac{U}{R}$. Оскільки напруга в мережі є незмінною, збільшення сили струму можливе тільки за умови зменшення загального опору кола. Споживачі струму в квартирі з'єднані паралельно, тому, якщо ввімкнути одразу кілька потужних споживачів, загальний опір кола суттєво зменшиться, відповідно сила струму в колі значно збільшиться.

Різко збільшується сила струму в колі й у випадку *короткого замикання* — з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором даної ділянки. Так, коротке замикання може виникнути в разі порушення ізоляції проводів або під час ремонту елементів електричного кола, які перебувають під напругою (нагадаємо, що це є смертельно небезпечним!).

3 Застосовуємо запобіжники

Щоб уникнути пожежі у випадку короткого замикання або перевантаження електричного кола, а також не допустити псування споживачів електричної енергії під час небезпечного збільшення сили струму, використовують *запобіжники* — пристрої, які розмикають коло в разі, якщо сила струму в ньому збільшиться понад норму (рис. 35.5, 35.6).

Рис. 35.4. Повертаючи тумблер праски, ми настроюємо праску на певний температурний режим

Рис. 35.5. Автоматичні запобіжники. Робоча частина автоматичного запобіжника — біметалева пластина. У разі збільшення сили струму понад норму біметалева пластина вигинається, в результаті чого коло розмикається. Після охолодження запобіжник знову можна повернути в робочий стан

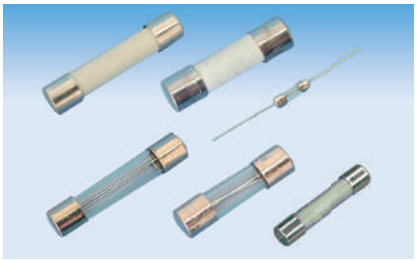


Рис. 35.6. Плавкі запобіжники, які застосовують у радіотехніці. Усередені скляної або керамічної трубочки з металевими наконечниками натягнутий тонкий дріт із легкоплавкого матеріалу

Сподіваємось, вам буде нескладно пояснити, як працюють плавкі запобіжники (див. рис. 35.6).

Увага! *Дуже небезпечно застосовувати несправні запобіжники або саморобні запобіжні пристрої. Якщо в разі збільшення сили струму понад норму коло своєчасно не розімкнеться, виникне пожежа.*

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Автоматичний запобіжник у квартирному електролічильнику розрахований на силу струму 10 А. Чи спрацює запобіжник, якщо одночасно ввімкнути лампу споживною потужністю 200 Вт, пральну машину потужністю 800 Вт, електричний чайник потужністю 1400 Вт? Напруга в мережі 220 В.

Аналіз фізичної проблеми. Для розв'язання задачі слід визначити загальну потужність $P_{заг}$ увімкнених споживачів. Якщо $P_{заг}$ споживачів менша від максимально можливої потужності струму P_{max}, на яку розрахований запобіжник, то запобіжник не спрацює, якщо більша — він розімкне коло.

Дано:

$I_{max} = 10$ А

$P_1 = 200$ Вт

$P_2 = 800$ Вт

$P_3 = 1400$ Вт

$U = 220$ В

Знайти:

P_{max} — ?

$P_{заг}$ — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

За будь-якого з'єднання споживачів їхня загальна потужність дорівнює сумі потужностей окремих споживачів:

$$P_{заг} = P_1 + P_2 + P_3.$$

Відповідно до формули для розрахунку потужності:

$$P_{max} = UI_{max}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканих величин:

$$[P] = \text{В} \cdot \text{А} = \text{Вт}; \quad P_{max} = 220 \cdot 10 = 2200 \text{ (Вт)};$$

$$P_{заг} = 200 + 800 + 1400 = 2400 \text{ (Вт)}.$$

Аналіз результату. Порівнявши загальну потужність увімкнених споживачів ($P_{заг} = 2400$ Вт) і потужність, на яку розрахований запобіжник ($P_{max} = 2200$ Вт), бачимо, що навантаження в колі перевищило максимально можливе значення. Отже, запобіжник спрацює, коло розімкнеться.

Відповідь: запобіжник розімкне коло.

Підбиваємо підсумки

Робота різноманітних електронагрівальних пристроїв ґрунтується на тепловій дії струму.

Під час роботи електронагрівальних пристроїв певна кількість теплоти виділяється і в підвідних проводах. Значне нагрівання проводів може стати причиною пожежі, тому, якщо є небезпека надмірного збільшення сили струму, до електричного кола приєднують запобіжник. Запобіжник являє собою пристрій, який розмикає електричне коло в разі, якщо сила струму перевищить значення, допустиме для цього кола.

Контрольні запитання

1. Які перетворення енергії відбуваються всередині електронагрівника в разі його ввімкнення в електричне коло? **2.** Які властивості повинен мати метал, із якого виготовляють нагрівальний елемент? **3.** Чому нагрівальний елемент має бути ізольований від корпусу нагрівального приладу? **4.** Що може стати причиною надмірного збільшення сили струму в електричному колі? До чого це може призвести? **5.** Що таке коротке замикання? **6.** З якою метою застосовують запобіжники? **7.** Поясніть принцип дії автоматичного запобіжника.

Вправа № 35

1. Якою є максимально допустима потужність струму в пристрої, якщо його плавкий запобіжник розрахований на максимальний струм 6 А за напруги 220 В?
2. Чому для запобігання займанню електропроводки особливу увагу слід приділяти якісному з'єднанню дротів один з одним та з приладами, які ввімкнено в мережу?
3. Яким вимогам має відповідати речовина, з якої виготовляють дріт для плавкого запобіжника?
4. Для приєднання зварювального апарата, який споживає струм силою 100 А, молодий робітник вирішив скористатися освітлювальним шнуром. Чому ви, знаючи фізику, ніколи цього не зробите?
5. Праска — один із найпоширеніших нагрівальних пристроїв, здавна використовуваних людиною. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся про історію створення праски та підготуйте коротке повідомлення.

6. Які з поданих тверджень є істинними?

а) Атом складається з ядра та розташованих навколо нього електронів.

б) Розмір ядра атома майже в 10 разів менший, ніж розмір атома.

в) У нейтральному атомі кількість електронів дорівнює кількості протонів.

г) Унаслідок дії електричного поля вільні електрони в металах прямують до позитивного полюса джерела струму, а протони — до негативного.

Експериментальне завдання

За паспортами й інструкціями до різних споживачів струму у вашій оселі з'ясуйте їхню потужність. Дізнайтеся в батьків, на яку силу струму розраховані запобіжники, що встановлені в електролічильнику. Визначте, скільки споживачів і які саме можна одночасно ввімкнути в одне відгалуження проводки.

Фізика і техніка в Україні

Історія **Львівського національного університету ім. Івана Франка** починається в XVII ст.: у 1661 р. польський король підписав диплом, що надавав єзуїтській колегії у Львові «гідність академії і титул університету». У 1773 р. орден єзуїтів було заборонено, а університет закрито. У 1784 р. імператор Йосиф II відновив роботу університету з латинською мовою викладання.

За століття, що минули з того часу, університет став одним із найпрестіжніших освітніх закладів України, здобув високий міжнародний авторитет, став потужним науковим осередком. Сьогодні в університеті працює 19 факультетів, серед яких особливо популярні факультети електроніки, механіко-математичний, прикладної математики та інформатики, фізичний.

Основу наукового потенціалу університету складають відомі в Україні та світі наукові школи: фізика твердого тіла, теоретична фізика, фізико-хімія полімерів, кристалохімія, біоенергетика й електрофізіологія секреторних клітин, мінералогічна школа академіка *Є. К. Лазаренка*.

§ 36. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ

Електричний струм можуть проводити рідини й тверді речовини, за певних умов електричний струм проводять і гази. Вивчення електричного струму в різних середовищах почнемо з вивчення струму в металах. По-перше, усі без винятку метали добре проводять електричний струм, а по-друге, саме з провідністю металів пов'язане широке застосування електричної енергії в житті людини.

1 З'ясовуємо природу електричного струму в металах

Із курсу хімії ви знаєте, що валентні електрони в металах легко залишають «свій» атом і стають вільними, а у вузлах кристалічної ґратки металу залишаються позитивні йони.

За відсутності електричного поля вільні електрони всередині металевого провідника рухаються хаотично. Цей рух нагадує рух молекул газу, саме тому вільні електрони в металах ще називають *електронним газом* (рис. 36.1). Якщо ж у провіднику створено електричне поле, то *електрони, не припиняючи хаотичного руху*, починають зміщуватись у бік позитивного полюса джерела струму. Рух електронів стає напрямленим — у металі виникне електричний струм.

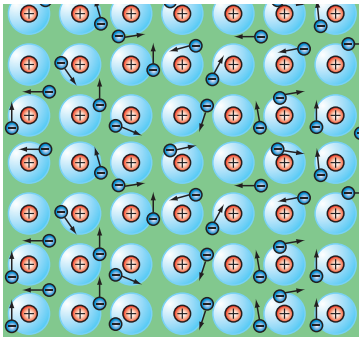


Рис. 36.1. Вільні електрони в металах за відсутності електричного поля рухаються хаотично

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

Природа струму в металах була експериментально встановлена російськими вченими *Леонідом Ісааковичем Мандельштамом* і *Миколою Дмитровичем Папалексі* (1913 р.) під час роботи в Страсбурзькому університеті; методику дослідів удосконалили американські фізики *Річард Толмен* і *Томас Стюарт* (1916 р.).

Учені розмірковували приблизно так. Якщо металевому дроту надати швидкого руху (рис. 36.2), а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки в дроті рухатимуться за інерцією (саме так у випадку різкої зупинки транспорту в ньому продовжують рух незакріплені предмети). У результаті в дроті виникне короткочасний струм — його зафіксує гальванометр; за напрямком відхилення стрілки гальванометра можна з'ясувати знак заряду частинок, рух яких спричинив появу струму. За допомогою більш складних дослідів учені дізналися, що електричний струм у металевому дроті створюють електрони.

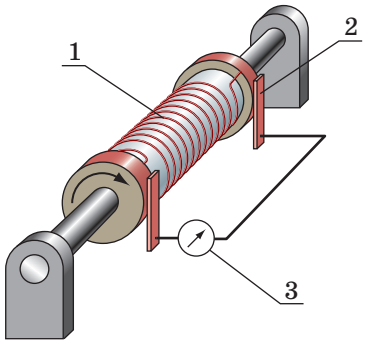


Рис. 36.2. Схема пристрою для вивчення природи електричного струму в металах: 1 — котушка з металевим дротом; 2 — ковзні контакти; 3 — чутливий гальванометр. Котушці надають швидкого обертання й різко зупиняють. У результаті в колі виникає електричний струм, який реєструється гальванометром

? За рис. 36.2 визначте напрямок руху електронів після зупинки котушки та напрямок короткочасного електричного струму, який при цьому виникає.

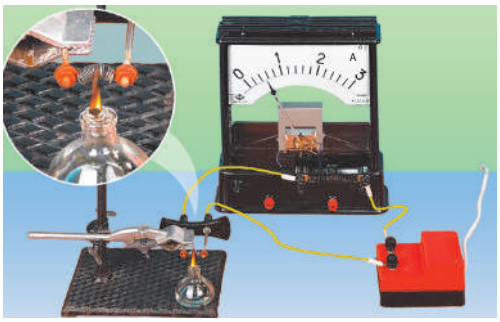


Рис. 36.3. Дослід, що демонструє залежність опору металів від температури. У процесі нагрівання спіралі сила струму в ній зменшується, отже, опір спіралі зростає

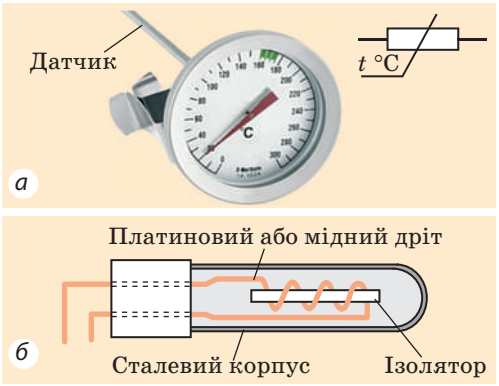


Рис. 36.4. Зовнішній вигляд і схематичне позначення термометра опору (*а*); будова датчика термометра (*б*). Датчик розміщують у середовищі, температуру якого вимірюють. Опір дроту вимірюється спеціальним приладом, і за відомим опором визначають температуру. На практиці шкалу приладу відразу градуюють в одиницях температури

2 Дізнаємося, як опір металів залежить від температури

Проведемо такий дослід. З'єднаємо сталеву спіраль із джерелом струму й підігріватимемо спіраль у полум'ї спиртівки (рис. 36.3). При цьому напругу будемо підтримувати незмінною. Дослід демонструє: у міру нагрівання спіралі сила струму в ній зменшується, а це означає, що опір спіралі зростає.

Якщо провести подібні досліди зі спіралями, виготовленими з інших металів, можна переконатися, що зі збільшенням температури опір цих спіралей також збільшується, але зміна опору кожного разу буде іншою.

Опір металевого провідника збільшується в разі підвищення температури та зменшується в разі її зниження. Зміна опору залежить від матеріалу, з якого виготовлений провідник.

Знаючи, як залежить опір металевого провідника від температури, можна, вимірявши опір провідника, визначити його температуру. Цей факт покладено в основу роботи так званих *термометрів опору* (рис. 36.4).

3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений *Г. Камерлінг-Оннес* (1853–1926), досліджуючи, як поводиться ртуть за температур, близьких до абсолютного нуля (–273 °С), помітив дивне явище: в разі зниження температури ртуті до 4,15 К (–269 °С) її питомий опір стрибком падає до нуля. Подібне відбувалося з оловом, свинцем та іншими металами. Це явище назвали *надпровідністю*. Надпровідність неможливо пояснити з погляду елементарної електронної теорії провідності металів. У 1957 р. група американських учених (рис. 36.5) і незалежно від них радянський учений *М. М. Боголюбов* (рис. 36.6) розробили квантову теорію надпровідності.

Рис. 36.5. Джон Бардін (1908–1991), Леон Ніл Купер (нар. 1930 р.), Джон Роберт Шріффер (1931–2019) — лауреати Нобелівської премії з фізики (1972 р.) за розробку квантової теорії надпровідності

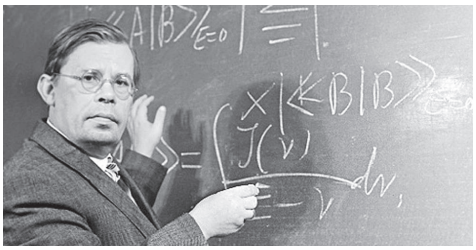


Рис. 36.6. Боголюбов Микола Миколайович (1909–1992) — видатний фізик-теоретик і математик. У 1929–1973 рр. працював в Академії наук України. Засновник наукових шкіл у галузі нелінійної механіки, статистичної фізики і квантової теорії поля

Підбиваємо підсумки

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів. За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо ж у металевому провіднику створити електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, починають рухатися напрямлено.

Опір металевих провідників залежить від температури. Цей факт покладено в основу роботи термометрів опору.

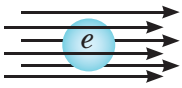
У разі зменшення температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля (–273 °С), їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.

Контрольні запитання

1. Опишіть характер руху вільних електронів у металах за відсутності електричного поля; за наявності електричного поля. **2.** Що являє собою електричний струм у металах? **3.** Опишіть суть досліду з виявлення природи електричного струму в металах. **4.** Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як? **5.** У чому полягає явище надпровідності?

Вправа № 36

1. Електрон розташований в електричному полі, силові лінії якого зображено на рисунку. Як напрямлена сила, з якою це поле діє на електрон?



2. Яке твердження з наведених є істинним?

а) Зі збільшенням температури опір металів збільшується.

б) Зі збільшенням температури опір металів зменшується.

в) Напрямок електричного струму в металевому провіднику збігається з напрямком руху електронів.

3. Металева нитка розжарення електричної лампи поступово тоншає через випаровування металу з її поверхні та врешті-решт перегоряє. Поясніть, чому нитка перегоряє в найтоншому місці й найчастіше в той момент, коли лампу вмикають.

4. У металевому провіднику завдовжки 10 см і з площею поперечного перерізу 0,4 см^2 тече струм силою 80 А. Якою є середня швидкість напрямленого руху електронів у провіднику, якщо в кожному кубічному сантиметрі провідника міститься $2{,}5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів?

5. Визначте значення і знак заряду отриманого йона, якщо: а) нейтральний атом міді втратив два електрони; б) нейтральний атом хлору приєднав один електрон.

Фізика і техніка в Україні

Лев Васильович Шубников (1901–1937) — видатний фізик-експериментатор зі світовим ім'ям. Значну частину свого короткого життя Л. В. Шубников мешкав у Харкові, де очолював створену ним лабораторію низьких температур при Харківському фізико-технічному інституті. Лев Васильович започаткував дослідження металів у надпровідному стані, коли електричний опір матеріалу дорівнює нулю. Також важливе значення мали експерименти з отримання зріджених газів, зокрема водню, азоту та кисню.

Найвища нагорода для вченого — це використання його прізвища для назви відкритого ним явища. «Ефект Шубникова — де Гааза», «фаза Шубникова», «метод Обреїмова — Шубникова» — це лише декілька прикладів внеску видатного вченого в сучасну фізику.

У 2001 р. на честь Л. В. Шубникова було названо наукову премію НАН України за видатні наукові роботи в галузі експериментальної фізики.

§ 37. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ

Дистильована вода — діелектрик, адже в ній майже немає вільних заряджених частинок; діелектриком є і кухонна сіль. Однак якщо дрібку кухонної солі кинути в дистильовану воду, то отриманий розчин добре проводитиме струм. Чому це так? Звідки в розчині взялися вільні частинки, які мають електричний заряд?

1 Знайомимося з електролітами

Багато кристалічних речовин являють собою позитивні і негативні йони, з'єднані в одне ціле силою електричного притягання. Так, кристали хлориду натрію — кухонної солі ($NaCl$) складаються з позитивних йонів натрію (Na^+) і негативних йонів хлору (Cl^-) (рис. 37.1), кристали сульфату міді ($CuSO_4$) — з позитивних йонів міді (Cu^{2+}) і негативних йонів сульфату (SO_4^{2-}). Якщо такі речовини розчинити у воді, вони можуть розпастися на окремі йони.

Розглянемо процес розпаду речовин на йони на прикладі розпаду кухонної солі $(NaCl)$ у воді (H_2O). Як ви вже знаєте з курсу хімії, молекули води є *полярними*: атоми водню й атом кисню в молекулі води розташовані несиметрично, тому з одного боку молекули домінує позитивний заряд, а з іншого боку — такий самий негативний (рис. 37.2, *а*). Отже, молекулу води можна уявити як *електричний дипо́ль** (рис. 37.2, *б*).

Коли кристалик солі $(NaCl)$ потрапляє у воду, диполі води оточують йони натрію та йони хлору, орієнтуючись певним чином (рис. 37.3, *а*). Деякі диполі води потрапляють у проміжки між йонами та значно послаблюють силу їх притягання. Унаслідок цього процесу і внаслідок теплового руху молекул води йони натрію і хлору відокремлюються від кристалика солі (рис. 37.3, *б*).

Розпад речовин на йони внаслідок дії полярних молекул розчинника називають **електролітичною дисоціацією** (від латин. *dissociatio* — роз'єднання, розділення).

У результаті електролітичної дисоціації в розчині з'являються вільні заряджені частинки — позитивні і негативні йони, тому розчин починає проводити струм.

Досліди показують, що розпад речовин на йони може бути спричинений не тільки розчинником. Деякі солі та оксиди металів можуть розпадатися на йони внаслідок значного збільшення температури. Тому розплави цих речовин теж проводять електричний струм. Розчини й розплави, які проводять електричний струм, відносять до **електролітів**.

2 Досліджуємо природу електричного струму в електролітах

Візьмемо два вугільні електроди та з'єднаємо їх із полюсами джерела струму (див. рис. 37.4). Електрод, з'єднаний із позитивним

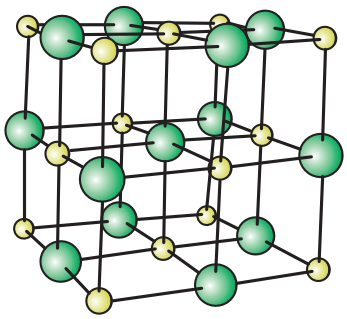


Рис. 37.1. Модель кристалічної ґратки кухонної солі $(NaCl)$: позитивні йони натрію (Na^+) — жовті кульки; негативні йони хлору (Cl^-) — зелені кульки

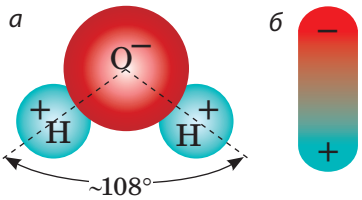


Рис. 37.2. Схематичне зображення молекули води

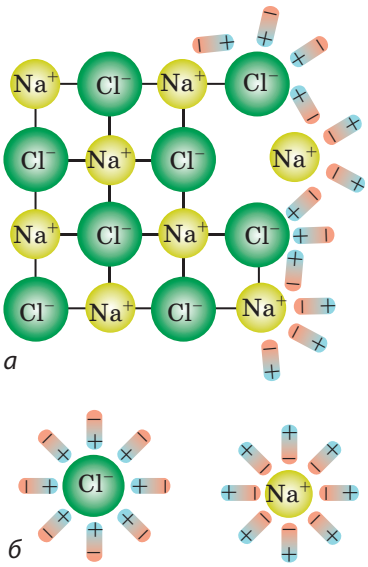


Рис. 37.3. Механізм електролітичної дисоціації кухонної солі

* *Електричний дипо́ль* — сукупність двох однакових за значенням різнойменних зарядів, які розташовані на певній відстані один від одного.

полюсом джерела струму, називають **анодом**, а електрод, з'єднаний із негативним полюсом, — **катодом**. Опустимо електроди в посудину з електролітом, наприклад із водним розчином хлориду міді ($CuCl_2$), і замкнемо коло. У розчині виникне електричне поле, через дію якого вільні позитивні йони міді (Cu^{2+}) попрямують до катода, а вільні негативні йони хлору (Cl^-) — до анода (рис. 37.4). Отже, в розчині виникне напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм.

Електричний струм в електролітах являє собою напрямлений рух позитивних і негативних йонів.

Йонний механізм провідності мають не тільки деякі розчини та розплави, а й деякі тверді речовини, наприклад йодид срібла (AgI), йодид калію (KI), сульфід срібла (Ag_2S). У твердих речовинах із йонною провідністю переміщуються йони тільки одного знаку — або тільки позитивні, або тільки негативні.

Електроліти — це тверді або рідкі речовини, які мають йонну провідність.

Зазначимо, що зі збільшенням температури кількість йонів у електролітах збільшується, відповідно збільшується й сила струму. Це означає, що *зі збільшенням температури опір електролітів зменшується*.

3 Даємо означення електролізу

У процесі проходження електричного струму через електроліт (на відміну від проходження струму через метал) відбувається перенесення хімічних складових електроліту й ті виділяються на електродах — осідають у вигляді твердого шару або виділяються в газоподібному стані. Наприклад, якщо через водний розчин хлориду міді протягом кількох хвилин пропускати струм, то поверхню катода вкриє тонкий шар міді (рис. 37.5), а на аноді виділиться газоподібний хлор. Наявність хлору можна виявити за характерним запахом.

Пояснимо, чому так відбувається. Під час проходження струму вільні позитивні йони міді (Cu^{2+}) прямують до катода, а вільні негативні йони хлору (Cl^-) — до анода (див. рис. 37.4). Досягши катода, катіони міді «беруть» з його поверхні електрони, яких їм «бракує», тобто

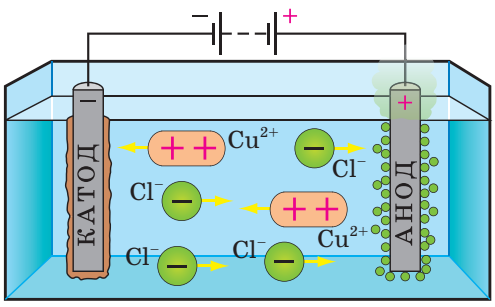


Рис. 37.4. Схема дослідження електричного струму в рідинах. У ванну з розчином електроліту ($CuCl_2$) занурені катод і анод. Після замикання кола позитивні йони рухаються до катода, негативні йони — до анода

відбувається *хімічна реакція відновлення*. Унаслідок цієї реакції йони міді перетворюються на нейтральні атоми; на поверхні катода осідає мідь. Водночас негативні йони хлору, досягши поверхні анода, навпаки, «віддають» йому «надлишкові» електрони — відбувається *хімічна реакція окиснення*; на аноді виділяється хлор.

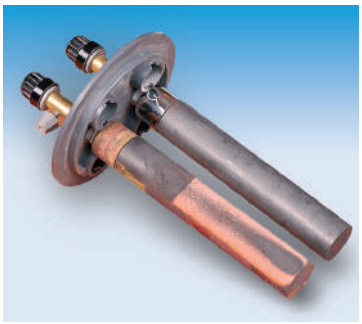


Рис. 37.5. Через кілька хвилин після початку пропускання струму через розчин хлориду міді поверхню катода вкриє тонкий шар міді

Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, які відбуваються на електродах під час проходження струму, називають **електролізом**.

4 Дізнаємося про перший закон Фарадея

Уперше явище електролізу докладно вивчив англійський фізик *М. Фарадей* (рис. 37.6). Він сформулював закон, який згодом назвали **законом електролізу**, або **першим законом Фарадея**:

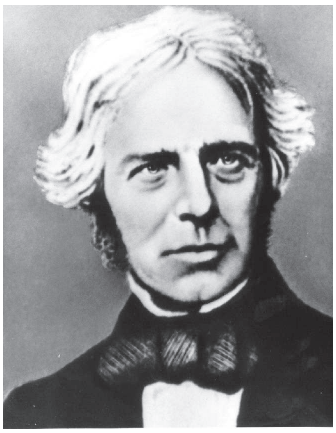


Рис. 37.6. Майкл Фарадей (1791–1867) — англійський фізик, засновник учення про електромагнітне поле. Виявив хімічну дію електричного струму, установив закони електролізу і здійснив чимало інших видатних відкриттів

Маса речовини, яка виділяється на електроді, прямо пропорційна заряду, який пройшов через електроліт:

$$m = kq\,,$$

де m — маса речовини; k — коефіцієнт пропорційності, який називають *електрохімічним еквівалентом*; q — значення електричного заряду.

Електрохімічний еквівалент *чисельно дорівнює масі певної речовини, яка виділяється на електроді внаслідок проходження через електроліт заряду* 1 Кл.

Одиниця електрохімічного еквіваленту в СІ — **кілограм на кулон:**

$$[k] = 1\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}\,.$$

Електрохімічні еквіваленти в мільйони разів менші від $1\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$, тому в таблицях (див. табл. 8 *Додатка*) їх частіше подають у міліграмах на кулон: $1\ \frac{\text{мг}}{\text{Кл}} = 1 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Так, електрохімічний еквівалент срібла $\left(Ag^{+}\right)$ дорівнює 1,12 $\frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$, а електрохімічний еквівалент алюмінію $\left(Al^{3+}\right)$ — 0,09 $\frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$.

Зверніть увагу: перший закон електролізу можна також записати в такому вигляді:

$$m = kIt,$$

де m — маса речовини; k — електрохімічний еквівалент; I — сила струму в електроліті; t — час, протягом якого тривав електроліз.

Доведіть ідентичність формул $m = kq$ і $m = kIt$.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Щоб визначити електрохімічний еквівалент міді, через розчин сульфату міді протягом 30 хв пропускали струм силою 0,5 А. Яке значення електрохімічного еквівалента отримали, якщо маса катода до початку досліду була 75,20 г, а після досліду — 75,47 г?

Аналіз фізичної проблеми. Для розв'язання задачі скористаємося законом електролізу. Масу міді, яка виділилася на катоді, знайдемо як різницю мас катода після досліду й до нього. Електрохімічні еквіваленти найчастіше подають у міліграмах на кулон, тому маси катода подамо в міліграмах.

Дано:

$t = 1800$ с

$I = 0{,}5$ А

$m_1 = 75\,200$ мг

$m_2 = 75\,470$ мг

Знайти:

k — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Відповідно до першого закону Фарадея маємо: $m = kIt$, отже, $k = \frac{m}{It}$; при цьому $m = m_2 - m_1$. Одержуємо:

$$k = \frac{m_2 - m_1}{It}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[k] = \frac{\text{мг}}{\text{А}\cdot\text{с}} = \frac{\text{мг}}{\text{Кл}};\quad k = \frac{75470 - 75200}{0{,}5\cdot 1800} = \frac{270}{900} = 0{,}30\left(\frac{\text{мг}}{\text{Кл}}\right).$$

Аналіз результату. Зіставивши одержане значення електрохімічного еквівалента міді з табличним $\left(k = 0{,}33\,\frac{\text{мг}}{\text{Кл}}\right)$, бачимо, що результати практично збіглися. Похибка могла виникнути, наприклад, через неточність вимірювання маси. Отже, задачу розв'язано правильно.

Відповідь: $k = 0{,}30\ \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$.

Підбиваємо підсумки

Електроліти — це тверді та рідкі речовини, які мають йонну провідність. Розпад електролітів на йони внаслідок дії полярних

молекул розчинника називають електролітичною дисоціацією. У результаті дисоціації в розчині з'являються вільні заряджені частинки — позитивні і негативні йони.

Електричний струм в електролітах — це напрямлений рух позитивних і негативних йонів.

Під час проходження електричного струму через електроліт хімічні складові електроліту осідають на електродах або виділяються в газоподібному стані. Це явище називають електролізом. Електроліз — це процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, які відбуваються на електродах під час проходження струму.

Для електролізу справджується перший закон Фарадея (закон електролізу): маса m речовини, яка виділяється на електроді, прямо пропорційна заряду q, що пройшов через електроліт: $m = kq$, або $m = kIt$. Коефіцієнт пропорційності k називають електрохімічним еквівалентом.

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище електролітичної дисоціації? Наведіть приклади. **2.** Що таке електроліт? **3.** Що являє собою електричний струм в електролітах? **4.** Опишіть процес електролізу. **5.** Сформулюйте перший закон Фарадея. **6.** Яким є фізичний зміст електрохімічного еквівалента?

Вправа № 37

1. Скориставшись законом електролізу, виведіть одиницю електрохімічного еквівалента в СІ.

2. Дистильована вода не є провідником. А чому водопровідна вода, річкова й морська вода проводять електричний струм?

3. Чому розчин солі у воді добре проводить електричний струм, а розчин цукру у воді — погано?

4. Під час електролізу, де електролітом був розчин нітрату срібла, на катоді виділилося 25 г срібла. Скільки часу тривав електроліз, якщо сила струму була незмінною й дорівнювала 0,5 А?

5. Через розчин нітрату срібла протягом 2 год пропускали електричний струм. Визначте масу срібла, яке виділилося на катоді, якщо напруга на електродах була 2 В, а опір розчину — 0,4 Ом.

6. Під час електролізу, де електролітом був розчин сульфатної кислоти, за 50 хв виділилося 3 г водню. Визначте втрати потужності на нагрівання електроліту, якщо його опір становив 0,4 Ом.

7. Син коваля й учень палітурника Майкл Фарадей зміг стати видатним ученим свого часу. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про життя М. Фарадея та історію його відкриттів.

8. Під час сріблення сталевої ложки на її поверхню було нанесено тонкий шар срібла завтовшки 55 мкм. Визначте масу срібла, якщо площа поверхні ложки дорівнює 40 см^2.

§ 38. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Існує легенда, що наприкінці XVIII ст. король Англії надіслав у подарунок російській імператриці Єкатерині ІІ… алюмінієвий кухоль. Зараз це складно навіть уявити, але вона була вражена таким коштовним подарунком! Річ у тім, що в ті часи алюміній був дуже рідкісним і коштував у кілька разів дорожче від золота. Згодом завдяки застосуванню електролізу алюміній став загальнодоступним і досить недорогим. Про те, як за допомогою електролізу одержують метали і де ще застосовують електроліз, ітиметься в цьому параграфі.

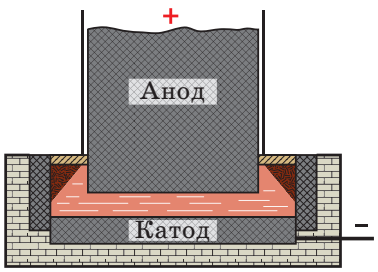


Рис. 38.1. Виробництво алюмінію (схема промислового пристрою). Дно та стінки ванни слугують катодом; алюміній збирається на дні ванни. Вугільний блок слугує анодом, на ньому виділяється кисень

1 Застосовуємо електроліз для одержування металів

Електроліз широко застосовують у промисловості. За допомогою електролізу із солей і оксидів одержують багато металів: мідь, нікель, алюміній та ін. Наприклад, щоб одержати алюміній, як електроліт використовують оксид алюмінію (Al_2O_3), розчинений у розплавленому кріоліті (Na_3AlF_6) за температури 950 °С. Розчин поміщають у спеціальні електролітичні ванни; катодом зазвичай слугують дно та стінки ванни, викладені графітом, а анодом — занурені в електроліт вугільні блоки. Під час пропускання струму через електроліт на катоді виділяється алюміній (рис. 38.1).

2 Одержуємо чисті метали

Метали, отримані шляхом електролізу (або іншим способом), зазвичай містять деяку кількість домішок, адже сировина не може бути «ідеальною». Так, у розплаві завжди наявні солі й оксиди інших металів, які так само можуть виділятися на катоді. Для очищення металів від домішок можна знову використати електроліз.

Спосіб очищення металів за допомогою електролізу називають **рафінуванням**.

У такий спосіб очищують мідь, алюміній, свинець, срібло та деякі інші метали. Як приклад розглянемо очищення міді.

У ванну з розчином сульфату міді ($CuSO_4$) занурюють два електроди. Анодом слугує товста пластинка неочищеної міді, а катодом — тонка пластинка чистої міді (рис. 38.2). У розчині сульфат міді розпадається на йони міді (Cu^{2+}) та йони сульфату (SO_4^{2-}). Йони міді прямують до катода й осідають на ньому. Йони сульфату рухаються до анода та «забирають» у нього йони міді. Відтворений таким чином сульфат міді опиняється в розчині й там розпадається. Урешті-решт чиста мідь переноситься з анода на катод. Анод при цьому розчиняється, а домішки осідають на дні або залишаються в розчині.

3 Знайомимося з гальваностегією

За допомогою електролізу можна наносити тонкий шар металу на поверхню виробу — робити сріблення, золочення, нікелювання, хромування тощо. Такий шар може захищати від корозії, збільшувати міцність виробу або просто ставати його прикрасою.

Електролітичний спосіб покриття виробу тонким шаром металів називають **гальваностегією**.

Виріб, який бажають покрити шаром певного металу, занурюють у ванну з розчином електроліту, до складу якого входить цей метал. Виріб слугує катодом, а пластинка металу, яким покривають виріб, — анодом. Під час пропускання струму метал осідає на виробі (катоді), а анодна пластинка поступово розчиняється (рис. 38.3).

4 Вивчаємо гальванопластику

Гальванопластика — це отримання за допомогою електролізу точних копій рельєфних виробів.

Спочатку з воску або іншого пластичного матеріалу роблять зліпок рельєфного виробу. Щоб поверхня зліпка проводила струм, її покривають тонким шаром графіту. Потім зліпок поміщують у ванну з розчином електроліту; зліпок слугуватиме катодом. Анодом буде пластинка металу. Під час електролізу на зліпку нарощується досить товстий шар металу, що заповнює всі нерівності зліпка. Після припинення електролізу восковий зліпок відділяють від шару металу і в результаті отримують точну копію виробу (рис. 38.4).

Зрозуміло, що застосування електролізу в сучасній техніці не обмежене розглянутими прикладами. За допомогою електролізу можна здійснити полірування поверхні анода; електроліз лежить в основі зарядження та розрядження кислотних і лужних акумуляторів тощо.

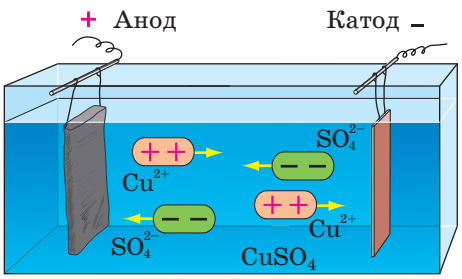


Рис. 38.2. Рафінування міді: тонка пластинка чистої міді є катодом, товста пластинка неочищеної міді — анодом; ванна наповнена водним розчином сульфату міді

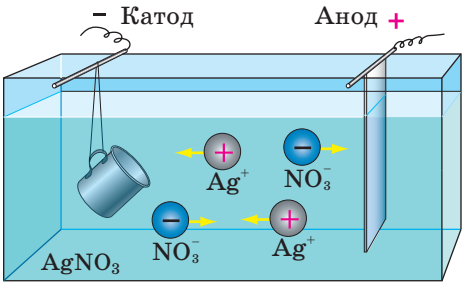
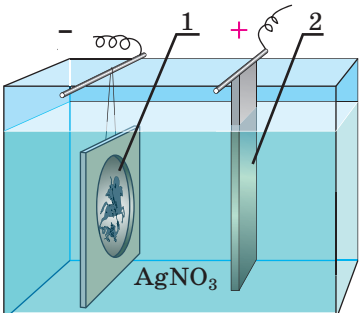


Рис. 38.3. Гальванічне сріблення. Предмет, який покривають сріблом (кухоль), є катодом, срібна пластинка — анодом; ванна наповнена розчином нітрату срібла



а

б

Рис. 38.4. Отримання рельєфних копій за допомогою електролізу: *а* — схема пристрою: восковий зліпок, покритий тонким шаром графіту, є катодом (1), срібна пластинка — анодом (2); ванна наповнена розчином нітрату срібла; *б* — одержана копія

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Під час нікелювання на кожний 1 дм^2 поверхні виробу, який нікелюють, подають силу струму 0,4 А. За який час на виріб буде нанесено шар нікелю завтовшки 0,02 мм?

Аналіз фізичної проблеми. Час перебігу електролізу визначимо, скориставшись першим законом Фарадея; масу речовини, що виділилася на катоді, подамо через густину та об'єм шару нікелю. Електрохімічний еквівалент і густину нікелю знайдемо відповідно в табл. 8 і 9 *Додатка*. Розв'язуючи задачу, густину зручно подати в грамах на кубічний сантиметр, а отже, товщину шару — в сантиметрах, площу поверхні — у квадратних сантиметрах, а електрохімічний еквівалент — у грамах на кулон.

Дано:

$S = 100\ \text{см}^2$

$I = 0{,}4\ \text{А}$

$d = 0{,}002\ \text{см}$

$\rho = 8{,}9\ \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

$k = 0{,}30\ \frac{\text{мг}}{\text{Кл}} = 0{,}0003\ \frac{\text{г}}{\text{Кл}}$

Знайти:

t — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Згідно із законом Фарадея: $m = kIt$.

Оскільки $m = \rho V$, а $V = Sd$, то $m = \rho Sd$.

Підставивши вираз для m у закон Фарадея, маємо: $\rho Sd = kIt$. Звідси $t = \frac{\rho Sd}{kI}$.

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{см}}{\frac{\text{г}}{\text{Кл}} \cdot \text{А}} = \frac{\text{г} \cdot \text{Кл}}{\text{г} \cdot \text{А}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{с};\quad t = \frac{8{,}9 \cdot 100 \cdot 0{,}002}{0{,}0003 \cdot 0{,}4} \approx 14\,800\ (\text{с});$$

$$t = 14\,800\ \text{с} \approx 4\ \text{год}\ 7\ \text{хв}.$$

Відповідь: $t \approx 4$ год 7 хв.

Підбиваємо підсумки

Електроліз широко застосовують у промисловості. За допомогою електролізу одержують багато металів із солей і оксидів (мідь, нікель, алюміній та ін.), а також очищують їх. Спосіб очищення металів за допомогою електролізу називають рафінуванням.

За допомогою електролізу можна нанести тонкий шар металу на поверхню виробу (здійснити сріблення, золочення, нікелювання, хромування тощо), виготовити точні копії рельєфних виробів. Електролітичний спосіб покриття виробу тонким шаром металу називають гальваностегією, а отримання за допомогою електролізу точних копій рельєфних виробів — гальванопластикою.

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади застосування електролізу. **2.** Опишіть процес отримання алюмінію за допомогою електролізу. **3.** Як можна очистити метали від домішок? **4.** Для чого поверхню металів покривають тонким шаром іншого металу? **5.** Що таке гальваностегія? гальванопластика?

Вправа № 38

1. На рис. 1 наведено схематичне зображення електричного кола.
1) Назвіть основні складові кола.
2) Який електрод слугує катодом, а який — анодом?
3) На якому електроді виділяється срібло?
4) Якою є сила струму в колі?
5) За який час на електроді утвориться шар срібла масою 784 мг?
6) Яку енергію буде витрачено під час сріблення, якщо напруга на електродах становить 11 В?

2. На рис. 2 наведено схематичне зображення електричного кола, до складу якого входить посудина з водним розчином сульфату цинку. За даними рисунка обчисліть товщину шару цинку, що утвориться на катоді в результаті електролізу.

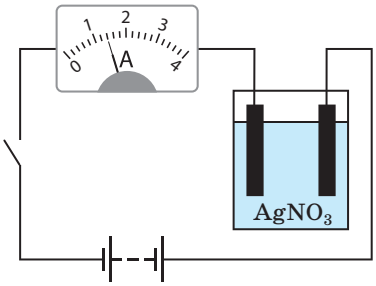


Рис. 1

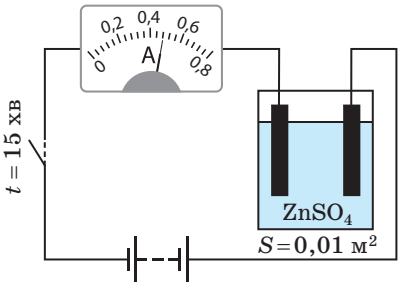


Рис. 2

3. Для сріблення ложок через розчин нітрату срібла пропускали струм силою 1,8 А. Катодом слугували 12 ложок, кожна з яких мала площу поверхні 50 см^2. Скільки часу тривав електроліз, якщо на ложках утворився шар срібла завтовшки 58 мкм?

4. Під час рафінування міді анодом слугує пластина неочищеної міді масою 2 кг, яка має 12 % домішок. Скільки енергії необхідно витратити для очищення цієї міді, якщо процес відбувається за напруги 6 В?

5. З наведених речовин і матеріалів виберіть ті, які є провідниками, і ті, які є діелектриками: 1) дистильована вода; 2) мідь; 3) повітря; 4) морська вода; 5) золото; 6) ртуть; 7) гума; 8) порцеляна.

§ 39. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ

Прочитавши назву параграфа, дехто з вас здивується: ми ж на початку розділу вивчали, що гази є діелектриками, а це означає, що в них немає вільних заряджених частинок. Тож про який електричний струм може бути мова?

Зауваження цілком слушне, але йшлося про те, що гази є діелектриками *за звичайних умов*. Існують умови, за яких гази можуть ставати провідниками. Про те, коли це відбувається і що собою являє електричний струм у газах, ітиметься в цьому параграфі.

1 Проводимо експеримент

Складемо електричне коло з *потужного* джерела струму, гальванометра та двох металевих пластин, розділених повітряним проміжком. Замкнувши коло, побачимо, що стрілка гальванометра не відхиляється (рис. 39.1, *а*). А це означає, що в колі немає електричного струму або струм такий слабкий, що навіть чутливий гальванометр його не реєструє. Отже, зробимо висновок: *за звичайних умов у повітрі майже немає вільних заряджених частинок і воно не проводить електричний струм.*

Помістимо між металевими пластинами запалену спиртівку — стрілка гальванометра відхилиться (рис. 39.1, *б*). Це означає, що в повітрі з'явилися вільні заряджені частинки і воно почало проводити електричний струм. З'ясуємо, що це за частинки, звідки і як вони з'явилися.

2 Знайомимося з механізмом провідності газів

На відміну від металів та електролітів гази складаються з електрично нейтральних частинок (атомів і молекул), тому за звичайних умов повітря є ізолятором.

Коли полум'я спиртівки нагріває повітря, кінетична енергія теплового руху частинок повітря збільшується настільки, що в разі їх зіткнення від частинки може відірватися електрон і стати вільним. Втративши електрон, молекула (або атом) стає позитивним йоном (рис. 39.2).

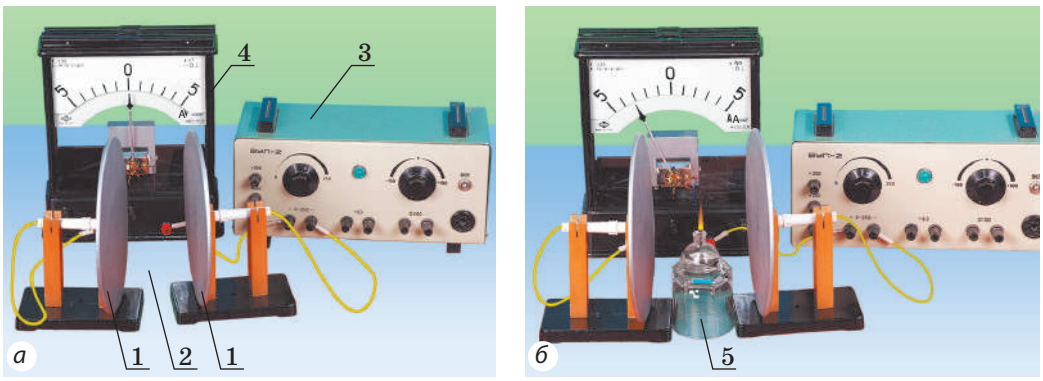


Рис. 39.1. Експеримент із вивчення провідності газів: 1 — металеві пластини; 2 — повітряний проміжок; 3 — потужне джерело струму; 4 — гальванометр; 5 — спиртівка. За звичайних умов повітря не проводить електричного струму (*а*); у разі внесення в повітряний проміжок запаленої спиртівки повітря стає провідником (*б*)

Здійснюючи тепловий рух, електрон може зіткнутися з нейтральною частинкою і вона його захопить — утвориться негативний йон (рис. 39.3).

Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із молекул (атомів) газу називають **йонізацією**.

Якщо *йонізований* газ помістити в електричне поле, то внаслідок дії цього поля позитивні йони рухатимуться в напрямку силових ліній поля, а електрони та негативні йони — в протилежному напрямку (рис. 39.4). У газі виникне електричний струм.

Електричний струм у газах являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

Електричний струм у газах інакше називають **газовим розрядом**. Слід звернути увагу на той факт, що газ може стати йонізованим не тільки в результаті підвищення його температури, але й внаслідок впливу інших чинників. Наприклад, верхні шари атмосфери Землі йонізуються під дією космічних променів; сильний йонізаційний вплив на газ мають рентгенівські промені й т. д.

3 Даємо означення несамостійного газового розряду

Досліди показують: якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (прибрати пальник, вимкнути джерело рентгенівського випромінювання тощо), то газовий розряд зазвичай припиняється.

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**.

З'ясуємо, чому після закінчення дії йонізатора газовий розряд припиняється.

По-перше, у процесі теплового руху електронів і позитивних йонів може відбутися *рекомбінація* — об'єднання їх у нейтральну молекулу (атом) (рис. 39.5).

По-друге, внаслідок дії поля вільні електрони рухаються до позитивного електрода (анода) і поглинаються ним; негативні йони рухаються

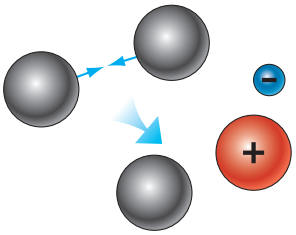


Рис. 39.2. Схема йонізації молекули газу. Втративши в результаті зіткнення електрон, молекула стає позитивним йоном

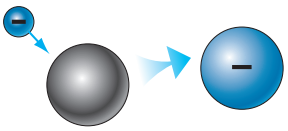


Рис. 39.3. Схема утворення негативних йонів у газі: електрон захоплюється нейтральною молекулою

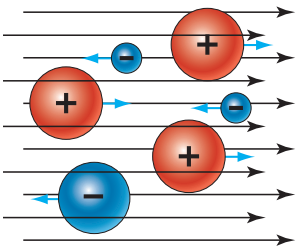


Рис. 39.4. У йонізованому газі за наявності електричного поля виникає напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм

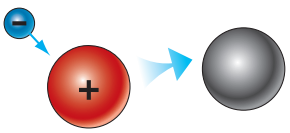


Рис. 39.5. Схема рекомбінації (відновлення) молекул газу

до анода, «віддають» йому «зайві» електрони і перетворюються на нейтральні частинки; позитивні йони, досягши негативного електрода (катода), «забирають» у нього електрони і теж перетворюються на нейтральні частинки. Нейтральні молекули й атоми повертаються в газ.

Отже, якщо йонізатор «працює», у газі безперервно з'являються нові йони; після припинення дії йонізатора кількість вільних заряджених частинок у газі швидко зменшується і газ перестає проводити струм.

4 Дізнаємося про йонізацію електронним ударом

За певних умов газ може проводити електричний струм і після припинення дії йонізатора.

Газовий розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.

Розглянемо, як відбувається самостійний газовий розряд.

Під час руху в електричному полі швидкість електрона поступово збільшується. Проте це збільшення не може відбуватися нескінченно, оскільки електрон стикається з частинками газу. Якщо між зіткненнями електрон устигне набути великої швидкості, то, зіткнувшись із нейтральними атомом чи молекулою, він може вибити з них електрон, іншими словами, може їх *йонізувати*. У результаті йонізації утворюються позитивний йон і ще один електрон. Послідовність таких зіткнень приводить до створення *електронної лавини* (рис. 39.6). Описаний процес називають **ударною йонізацією** або **йонізацією електронним ударом**.

Електрони, що утворилися внаслідок ударної йонізації, прямують до анода і врешті-решт поглинаються ним. Проте газовий розряд не припиниться, якщо в ньому будуть з'являтися нові електрони. Одним із джерел нових електронів може бути поверхня катода. Річ у тім, що позитивні йони прямують до катода й вибивають із нього нові електрони. Іншими словами, внаслідок бомбардування катода позитивними йонами відбувається *емісія (випускання)* електронів з поверхні катода.

Таким чином, *самостійний газовий розряд підтримується за рахунок ударної йонізації та за рахунок емісії електронів із поверхні катода*.

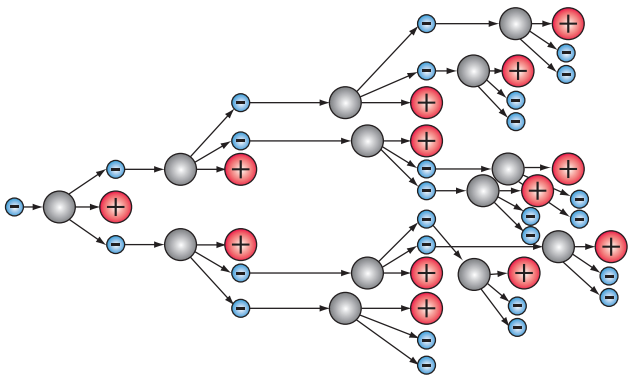


Рис. 39.6. Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, йонізує молекулу або атом і звільняє ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два. До анода летять уже чотири електрони і т. д. Число вільних електронів збільшується лавиноподібно доти, доки вони не досягнуть анода

5 З'ясовуємо, за яких умов можлива йонізація електронним ударом

Щоб електрон зміг у разі зіткнення вибити електрон із нейтральних атома чи молекули, він має набути достатньої кінетичної енергії. Це може відбутися у двох випадках: якщо електрон буде дуже довго розганятись або якщо він буде розганятися дуже швидко.

За нормального тиску ($p \approx p_{атм}$) електрони в газах дуже часто стикаються з атомами і молекулами газу, тому *електричне поле*, в якому рухається електрон, *має бути досить сильним*, щоб електрон до зіткнення встиг набути енергії, необхідної для йонізації.

Якщо ж тиск газу малий ($p < 0{,}1p_{атм}$), тобто *газ є досить розрідженим*, то час між зіткненнями значно збільшується й електрон може набути енергії, необхідної для йонізації молекули (атома), в слабшому полі.

Підбиваємо підсумки

За звичайних умов газ практично не містить вільних заряджених частинок, тому не проводить електричного струму. Щоб газ почав проводити струм, його необхідно йонізувати. Йонізацією газу називають процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із електрично нейтральних атомів і молекул.

Електричний струм у газах являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом. Розряд у газі, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним газовим розрядом — він можливий завдяки йонізації електронним ударом і завдяки емісії електронів з поверхні катода.

Контрольні запитання

1. Чому за звичайних умов газ не проводить електричний струм? **2.** Який газ називають йонізованим? **3.** Що таке йонізація? **4.** Який розряд у газі називають несамостійним? **5.** Чому після закінчення дії йонізатора несамостійний газовий розряд швидко припиняється? **6.** Дайте означення самостійного газового розряду. **7.** Опишіть механізм ударної йонізації. **8.** Яким ще шляхом, крім йонізації електронним ударом, поповнюється нестача вільних електронів у випадку самостійного газового розряду?

Вправа № 39

1. В електричному полі, створеному двома різнойменно зарядженими пластинами (рис. 1), міститься йонізований газ. Перенесіть рисунок до зошита. Зобразіть силові лінії електричного поля між пластинами. Покажіть напрямок руху електронів і йонів. Яким буде рух нейтральних частинок?

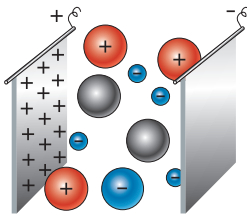


Рис. 1

2. Чому в разі охолодження газів їхня провідність падає?
3. Чим йонізація газів відрізняється від електролітичної дисоціації?
4. Що спільного і в чому різниця між електричним струмом у газах, рідинах і металах?
5. Цікавим прикладом несамостійного газового розряду є газовий розряд у плазмовій кулі (рис. 2). Розріджений газ у кулі йонізується електричним струмом дуже високої частоти. Ті з вас, хто бачив, як працює така лампа, напевно, згадають: якщо кулі торкнутися рукою, то промені притягуються до руки. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, чому це відбувається, що є спільним між цим явищем і роботою сенсорного екрана, хто був винахідником плазмової кулі та ін.

Рис. 2

6. Перенесіть таблицю до зошита та заповніть її. У кожному стовпчику наведіть не менш ніж п'ять прикладів фізичних величин.

Фізичні величини, які характеризують:		
певну речовину	певне фізичне тіло	певний фізичний процес

Фізика і техніка в Україні

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ)

Практично кожного дня ми зустрічаємося з явищем дугового розряду або наслідками його дії. Це і маленькі «сонця», які палають у руках робітників на будмайданчиках, і звичайні петлі, приварені до вхідних дверей вашої оселі. Саме завдяки зварюванню дуговий розряд набув такого поширення. Безперечний світовий авторитет України в цій галузі забезпечили роботи вчених Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона. Світове визнання інститут здобув завдяки новітній для свого часу технології зварювання під флюсом, яку розробив засновник і перший директор інституту академік *Євген Оскарович Патон* (1870–1953).

На фото — відомий суцільнозварний міст Патона в Києві. Цей міст Американське зварювальне товариство визнало видатною зварною конструкцією XX ст.

Під керівництвом академіка *Бориса Євгеновича Патона* (1918–2020), який очолював Інститут електрозварювання в 1953–2020 рр., розроблені не тільки традиційні засоби зварювання для промисловості, а й новітні технології, які застосовують у космосі й навіть для зварювання живих тканин.

§ 40. ВИДИ САМОСТІЙНИХ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ

Яскраві (а іноді й небезпечні) явища: блискавка, полярне сяйво, моторошні для необізнаної людини «вогні святого Ельма», різнобарвне світіння газорозрядних трубок, сліпуче світло під час зварювання металу — усе це приклади різних самостійних газових розрядів. Від чого залежить і як виникає той чи інший електричний розряд у газах, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 Дізнаємося про іскровий газовий розряд

За атмосферного тиску та великої напруги між електродами виникає **іскровий газовий розряд**. Іскорки, які з'являються, коли ви знімаєте синтетичний светр; блискавка під час грози; іскра, що виникає між зарядженими кондукторами електрофорної машини (рис. 40.1), — усе це приклади іскрового розряду.

Рис. 40.1. Іскровий розряд між зарядженими кондукторами електрофорної машини

Іскровий розряд має вигляд яскравих зиґзаґоподібних смужок, що розгалужуються (рис. 40.2). Він триває всього кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується характерними звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). Річ у тім, що температура газу, а отже, й тиск у ділянці розряду різко підвищуються, в результаті повітря швидко розширюється і виникає ударна хвиля, яку ми сприймаємо як звук.

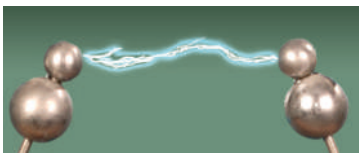


Рис. 40.2. Вигляд іскрового розряду

У техніці іскровий розряд використовують, наприклад, у запальних свічках бензинових двигунів (рис. 40.3), для обробки особливо міцних металів.

Рис. 40.3. Електрична напруга між електродами запальної свічки становить 12–15 тис. вольтів

Прикладом грандіозного іскрового розряду в природі є *блискавка*.

У результаті наукових досліджень було встановлено, що під час грози відбувається перерозподіл зарядів у грозовій хмарі, тому різні частини хмари заряджаються зарядами протилежних знаків. Зазвичай нижні шари хмари мають негативний заряд, а верхні — позитивний.

Напруга між двома хмарами, зверненими одна до одної різнойменно зарядженими частинами, або напруга між хмарою і Землею сягають кількох сотень мільйонів вольтів.

Рис. 40.4. Михайло Васильович Ломоносов (1711–1765) — видатний російський учений; один із засновників фізичної хімії; поет, художник, історик

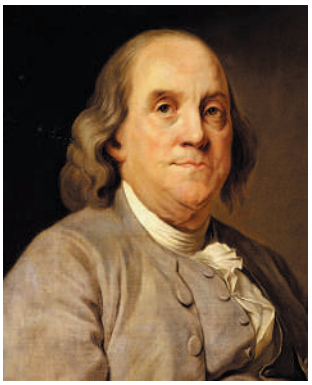


Рис. 40.5. Бенджамін Франклін (1706–1790) — американський учений, видатний державний діяч. Один із перших дослідників атмосферної електрики; запропонував конструкцію блискавковідводу

Завдяки ударній йонізації, а далі — йонізації випромінюванням, яке супроводжує розряд, в електричному полі між хмарами з'являються лавини вільних йонів і електронів, тобто виникає короткочасний самостійний газовий розряд — *блискавка*. Сила струму в каналі блискавки сягає сотень тисяч амперів.

Електричні властивості блискавки першими почали вивчати незалежно один від одного російський учений *М. В. Ломоносов* (рис. 40.4) і американський дослідник *Б. Франклін* (рис. 40.5).

2 Бережемося від удару блискавки

Підраховано, що в атмосфері земної кулі щосекунди проскакує близько 100 блискавок, і кожна двадцята з них ударяє в землю, іноді завдаючи чималої шкоди. Удар блискавки може викликати лісові пожежі, вивести з ладу лінії електропередачі та навіть призвести до загибелі людей.

Щоб не стати жертвою удару блискавки, слід пам'ятати, що блискавка частіше вдаряє у відносно високі предмети. Під час грози слід дотримуватися таких основних **правил**.

- Опинившись під час грози в полі, не можна бігти ним, — навпаки, потрібно лягти, щоб не вивищуватися над місцевістю.
- Під час грози в лісі не можна ховатися під високими деревами, а в полі — під поодиноким деревом, копицею сіна тощо.
- Під час грози не можна купатись у відкритих водоймах, а перебуваючи високо в горах, краще ховатися в печері або під глибоким уступом.
- Якщо гроза застала в автомобілі, не треба виходити з нього; слід зачинити вікна і двері та перечекати негоду.
- Під час грози не можна запускати повітряного змія: мокра мотузка стає провідником електрики, й блискавка може вдарити в змія. При цьому заряди пройдуть через руку й тіло людини в землю. До речі, саме так під час експерименту загинув друг і колега М. В. Ломоносова російський учений *Георг Ріхман* (1711–1753).

3 Дізнаємося про коронний газовий розряд

Перед грозою або під час грози біля гострих виступів предметів іноді можна спостерігати слабке фіолетове світіння у вигляді корони, що охоплює вістря. Дослідження показують, що причиною цього явища є самостійний газовий розряд, який називають коронним (рис. 40.6). З'ясуємо, чому і як виникає **коронний газовий розряд**.

На поверхні Землі під дією електричного поля грозової хмари накопичуються (індукуються) заряди, за знаком протилежні заряду хмари. Особливо щільно такі заряди розташовані на гострих частинах предметів. У результаті електричне поле біля вістря виявляється настільки сильним, що заряд стікає із загостреного предмета, йонізуючи довколишнє повітря. Оскільки поле є досить сильним тільки навколо вістря, то коронні розряди спостерігаються лише біля гострих частин предметів.

На виникненні коронного розряду ґрунтується дія *блискавковідводу*. Блискавковідвід являє собою загострений металевий стрижень, з'єднаний товстим провідником із металевим предметом (див. рис. 40.7). Стрижень установлюють вище за найвищу точку будинку, який захищають, а металевий предмет закопують глибоко в землю (на рівні ґрунтових вод). Під час грози на кінці блискавковідводу виникає коронний розряд. У результаті заряд не накопичується на будинку, а стікає з вістря блискавковідводу.

Вважається, що блискавковідвід винайшов Бенджамін Франклін у 1752 р. Проте подібні конструкції існували й раніше. Наприклад, щоб захиститися від блискавки, моряки Давньої Греції прив'язували мотузку до леза меча, меч прикріплювали до щогли, а кінець мотузки опускали в море.

Рис. 40.6. «Вогні святого Ельма» — коронний розряд біля гострих кінців корабельних щогл — багато століть сповнювали жахом мореплавців, які не могли правильно пояснити їхню природу

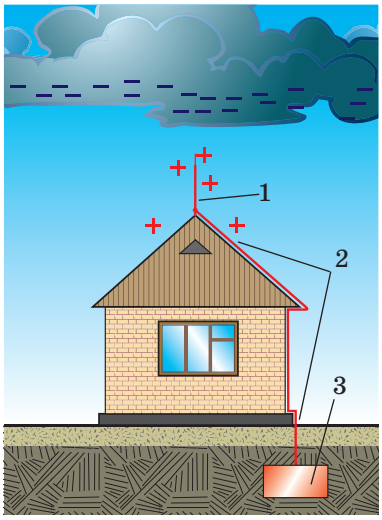


Рис. 40.7. Блискавковідвід (громовідвід): 1 — загострений металевий стрижень; 2 — провідник — товстий з'єднувальний провід; 3 — металевий предмет, закопаний глибоко у землю

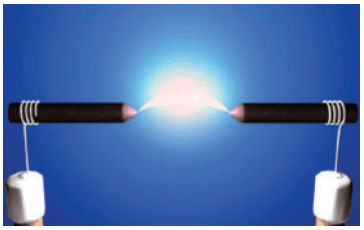


Рис. 40.8. Дуговий газовий розряд

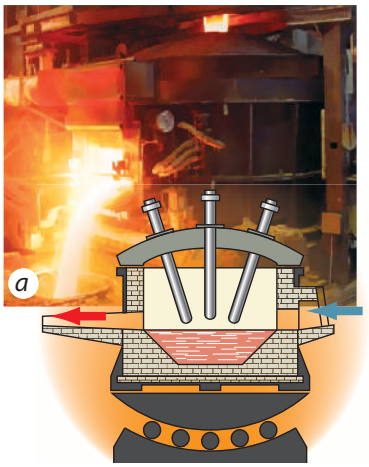


Рис. 40.9. Застосування дугового газового розряду для плавлення (*а*) та зварювання (*б*) металів

4 Спостерігаємо дуговий газовий розряд

У 1802 р. російський фізик *Василь Володимирович Петров* (1761–1834) провів такий дослід. Він приєднав два вугільні електроди до полюсів великої електричної батареї, з'єднав електроди один з одним, а потім трохи розсунув. Між кінчиками електродів учений спостерігав яскраве дугоподібне полум'я, а самі кінчики розжарювалися, випромінюючи сліпуче біле світло. Так було отримано ще один вид самостійного газового розряду — **дуговий газовий розряд (електрична дуга)** (рис. 40.8). З'ясуємо причину його виникнення.

Коли електроди з'єднані, електричне коло є замкненим і в ньому йде досить сильний електричний струм. У місці з'єднання опір кола найбільший, отже, саме тут відповідно до закону Джоуля — Ленца виділяється найбільша кількість теплоти. Кінці електродів розжарюються до 4000–7000 °С, і з поверхні катода починають вилітати електрони (відбувається термоелектронна емісія).

Тепер, навіть якщо електроди розвести, через газовий проміжок між ними проходитиме струм, оскільки в газі між електродами буде достатня кількість вільних заряджених частинок (вільні електрони, що «випарувалися» з катода, а також вільні електрони та йони, що з'явилися внаслідок йонізації газу через високу температуру). Надалі висока температура катода й анода підтримується бомбардуванням електродів позитивними і негативними йонами та електронами, прискореними електричним полем.

Висока температура йонізованого газу у випадку дугового розряду, а також випромінювання світла, яке супроводжує такий розряд, забезпечили широке застосування електричної дуги в науці, техніці, промисловості. Електрична дуга «працює» як потужне джерело світла в прожекторах. У металургії застосовують електропечі, в яких використовують дуговий розряд; жаром електричної дуги зварюють метали тощо (рис. 40.9).

5 З'ясовуємо умови виникнення тліючого газового розряду

За *низького тиску*, що становить близько 5 мм рт. ст., можна спостерігати світіння розрідженого газу — **тліючий газовий розряд**. Нагадаємо, що за низького тиску відстань між частинками є настільки великою, що навіть у слабкому електричному полі електрони встигають за час між зіткненнями з атомами і молекулами газу набути енергії, достатньої для ударної йонізації.

Тліючий розряд використовують у лампах денного світла (люмінесцентних трубках), у квантових джерелах світла — газових лазерах. Крім того, його застосовують у кольорових газорозрядних трубках: колір світіння у випадку тліючого розряду визначається природою газу, а отже, може бути різним.

НЕБЕЗПЕЧНО

наближатися до високовольтних пристроїв (напругою тисячі й десятки тисяч вольтів), адже повітря, особливо вологе, може проводити електричний струм: залежно від напруги й умов, у яких перебувають обладнання та людина, ураження може відбутися на відстані в кілька десятків сантиметрів.

Підбиваємо підсумки

Розрізняють чотири основні види самостійних газових розрядів.

Іскровий газовий розряд виникає за атмосферного тиску та великої напруги між електродами. Він являє собою яскраві розглужені зиґзаґоподібні смужки. Прикладом гігантського іскрового розряду є блискавка. Удар блискавки може призвести до загибелі, тому під час грози необхідно суворо дотримуватися правил безпеки.

Самостійний газовий розряд, що виникає в сильному електричному полі біля гострих виступів предметів, називають коронним газовим розрядом.

За температури між електродами 4000–7000 °С, розведеними на невелику відстань, виникає газовий розряд, що супроводжується дуже яскравим світінням у формі дуги, — дуговий газовий розряд.

За низького тиску (близько 5 мм рт. ст.) можна спостерігати світіння розрідженого газу внаслідок тліючого розряду.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні види самостійних газових розрядів. **2.** Наведіть приклади іскрового газового розряду. За яких умов він виникає? **3.** Що таке блискавка? Коли й чому вона виникає? **4.** Назвіть основні правила безпеки, яких слід дотримуватися під час грози. **5.** Що являє собою коронний розряд? **6.** Які особливості дугового розряду забезпечили його широке застосування? **7.** Де застосовують електричну дугу? **8.** За яких умов виникає тліючий розряд? Де його використовують?

ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ ІІ «Електричні явища. Електричний струм»

1. У розділі ІІ ви ознайомилися з новими для вас фізичними величинами, зокрема з *електричним зарядом*.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД —
фізична величина, яка характеризує властивість частинок і тіл вступати в електромагнітну взаємодію

Позитивний	Негативний
Протон — носій елементарного позитивного заряду; $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	*Електрон* — носій елементарного негативного заряду; $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

2. Ви з'ясували, що таке *електризація* та як *наелектризувати тіло*.

ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ —
процес набуття заряду макроскопічними тілами

через тертя (електризація дотиком)	через вплив (електростатична індукція)

Під час електризації тіло завжди одержує або віддає деяку кількість електронів: $q = -N|e|$ — тіло одержало N електронів; $q = +N|e|$ — тіло віддало N електронів

3. Ви дізналися, що *заряджений об'єкт є джерелом електричного поля*.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ —
вид матерії, що існує навколо заряджених частинок і тіл та діє з певною силою на інші частинки й тіла, які мають електричний заряд

4. Ви вивчили *основні закони електростатики*.

ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ

Закон Кулона: $F = k\dfrac{\lvert q_1\rvert \cdot \lvert q_2\rvert}{r^2}$, — якщо заряди нерухомі точкові	*Закон збереження електричного заряду:* $q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}$, — якщо система зарядів замкнена

5. Ви довідалися про *електричний струм* і *умови його існування*.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ —
напрямлений рух частинок, які мають електричний заряд

УМОВИ ІСНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Наявність вільних заряджених частинок

- *У металах* — вільні електрони, які наявні завжди
- *У газах* — вільні електрони, позитивні і негативні йони, які утворюються внаслідок йонізації
- *В електролітах* — вільні позитивні і негативні йони, які утворюються внаслідок електролітичної дисоціації

Наявність електричного поля

Створюється джерелами струму, всередині яких відбувається перетворення різних видів енергії на енергію електричного поля

ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

хімічні ↔ механічні

світлові ↔ теплові

ЗАКОН ФАРАДЕЯ: $m = kIt = kq$

6. Ви вивчили *фізичні величини, які характеризують проходження струму в ділянці кола*, і простежили *зв'язок між ними*.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця в СІ	Формула для визначення	Прилад для вимірювання
Сила струму	I	А (ампер)	$I = q/t$	Амперметр
Напруга	U	В (вольт)	$U = A/q$	Вольтметр
Опір	R	Ом (ом)	$R = \rho l/S$	Омметр

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ДІЛЯНКИ КОЛА: $I = \dfrac{U}{R}$

7. Ви ознайомилися з різними *видами з'єднання провідників*.

Фізична величина	Вид з'єднання провідників	
	Послідовне	Паралельне
Сила струму	$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$	$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$
Напруга	$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$	$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$
Опір	$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$	$\dfrac{1}{R} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \ldots + \dfrac{1}{R_n}$

8. Ви спостерігали дію електричного струму та дізналися, *як визначити роботу і потужність струму; кількість теплоти*.

Робота струму: $A = UIt$

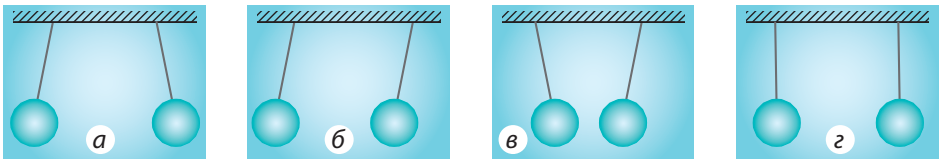
Потужність струму: $P = UI$

Кількість теплоти, яка виділяється за час проходження струму (*закон Джоуля — Ленца*): $Q = I^2Rt$

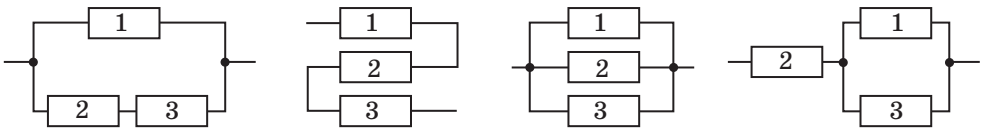
ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ ІІ «Електричні явища. Електричний струм»

Частина 1. Електричний заряд. Електричне поле. Електричний струм

1. (*1 бал*) На рисунку зображено чотири пари кульок, підвішених на шовкових нитках. На якому рисунку зображено кульки, заряджені однойменними зарядами?



2. (*1 бал*) На якому рисунку резистори 1 і 2 з'єднані послідовно?



3. (*1 бал*) На рис. 1 зображено силові лінії електричного поля, створеного двома зарядженими кульками. Яке твердження є істинним?

а) Обидві кульки мають позитивний заряд.
б) Обидві кульки мають негативний заряд.
в) Кулька 1 заряджена негативно, кулька 2 — позитивно.
г) Заряд кульки 1 більший за заряд кульки 2.

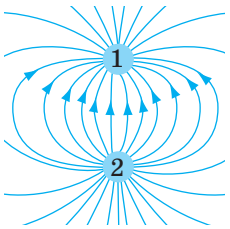
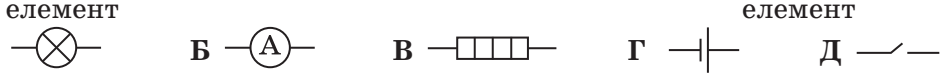


Рис. 1

4. (*1 бал*) Установіть відповідність між елементом електричного кола та його позначенням на схемі.

1 Нагрівальний елемент **2** Лампа **3** Ключ **4** Гальванічний елемент



5. (*2 бали*) Установіть відповідність між приладом і фізичною величиною, яку ним вимірюють.

1 Амперметр **2** Вольтметр **3** Омметр **4** Динамометр

А Сила **Б** Сила струму **В** Опір **Г** Густина **Д** Напруга

6. (*2 бали*) На цоколі електричної лампи ліхтарика написано: «4,4 В; 0,22 А». Яким є опір нитки розжарення лампи під час світіння?

а) 0,05 Ом; б) 0,968 Ом; в) 4,18 Ом; г) 20 Ом.

7. (*2 бали*) Яким є опір ніхромового дроту завдовжки 20 см і з площею поперечного перерізу 2 мм^2?

а) 0,11 Ом; б) 11 Ом; в) 22 Ом; г) 44 Ом.

8. (*2 бали*) Установіть відповідність між перетворенням енергії, що відбувається в технічному пристрої, і назвою пристрою.

1 Хімічна енергія перетворюється на електричну.
2 Електрична енергія перетворюється на механічну.
3 Електрична енергія перетворюється на теплову.
4 Світлова енергія перетворюється на електричну.

А Фотоелемент
Б Акумулятор
В Електродвигун
Г Нагрівач
Д Термопара

9. (*3 бали*) Протягом 10 с через ділянку кола пройшов електричний заряд 15 Кл, при цьому електричне поле на ділянці виконало роботу 315 Дж. Установіть відповідність між фізичними величинами та їхніми значеннями в одиницях СІ.

1 Напруга на ділянці **2** Сила струму в ділянці **3** Опір ділянки

А 1,5 **Б** 14 **В** 21 **Г** 31,5

10. (*3 бали*) Як за допомогою позитивно зарядженої провідної кульки 1 зарядити негативно таку саму, але незаряджену кульку 2, не збільшуючи й не зменшуючи заряду кульки 1?

11. (*3 бали*) Як змінилася відстань між двома точковими зарядами, якщо сила їхньої взаємодії зменшилась у 16 разів?

12. (*3 бали*) Резистори з опорами 3 і 6 Ом з'єднані послідовно. Визначте силу струму в колі та напругу на кожному резисторі, якщо загальна напруга на резисторах 1,8 В.

13. (*3 бали*) Три резистори з опором 9 Ом кожний з'єднані паралельно і приєднані до джерела струму, напруга на затискачах якого 12 В. Якою є сила струму в колі?

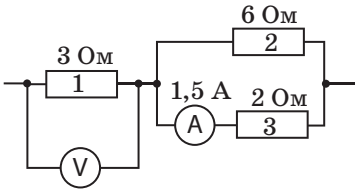


Рис. 2

14. (*4 бали*) Невелика провідна кулька із зарядом $6 \cdot 10^{-9}$ Кл торкнулася такої самої, але незарядженої кульки. З якою силою взаємодіють кульки після дотику, якщо вони розійшлися на відстань 9 см?

15. (*4 бали*) За рис. 2 визначте показ вольтметра і загальну напругу на ділянці.

16. (*4 бали*) Як зміняться покази приладів (рис. 3), якщо повзунок реостата перемістити ліворуч?

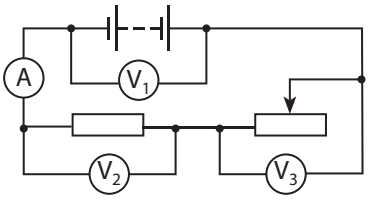


Рис. 3

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Частина 2. Робота і потужність електричного струму. Електричний струм у різних середовищах

У завданнях 1, 2 визначте правильне закінчення речення.

1. *(1 бал)* У газах вільні заряджені частинки можуть з'явитися в результаті...

а) електролітичної дисоціації
б) поляризації молекул газу
в) дії зовнішнього йонізатора
г) рекомбінації молекул газу

2. (*1 бал*) Очищення металів за допомогою електролізу називають...

а) гальваностегія
б) гальванопластика
в) електролітична дисоціація
г) рафінування

3. (*2 бали*) Установіть відповідність між видом самостійного газового розряду, який лежить в основі дії технічного пристрою, та назвою пристрою.

1 Дуговий розряд	**А** Блискавковідвід
2 Іскровий розряд	**Б** Запальна свічка
3 Коронний розряд	**В** Газорозрядна лампа
4 Тліючий розряд	**Г** Лампа розжарення
	Д Зварювальний апарат

4. *(2 бали)* На рис. 1 схематично зображено три дроти, які виготовлені з різних матеріалів і приєднані до джерела струму. Довжини дротів, а також площі їхніх поперечних перерізів однакові. У якому дроті виділяється найбільша кількість теплоти?

Рис. 1

а) у сталевому; б) мідному; в) ніхромовому; г) у дротах виділяється однакова кількість теплоти.

5. *(2 бали)* У провіднику протягом 10 с протікав електричний струм силою 0,3 А. Яку роботу виконав струм, якщо напруга на кінцях провідника була 4 В?

а) 0,12 Дж; б) 0,74 Дж; в) 3,6 Дж; г) 12 Дж.

6. *(2 бали)* Сила струму в нагрівальному елементі електричної праски становить 5 А, опір елемента — 40 Ом. Яка кількість теплоти виділяється в нагрівальному елементі протягом 5 хв?

а) 2 Дж; б) 200 Дж; в) 300 кДж; г) 5 кДж.

7. *(2 бали)* Якою є сила струму в нитці розжарення електричної лампи (рис. 2) за номінальної напруги?

а) близько 0,45 А; б) 2,2 А; в) 22 кА;
г) визначити неможливо.

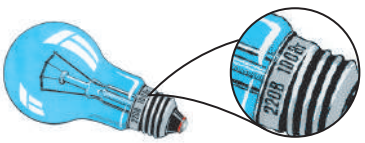


Рис. 2

8. *(2 бали)* Під час сріблення виробу протягом 1 год на катоді виділилося 2 г срібла. Якою приблизно була сила струму в процесі сріблення?
а) 0,3 А; б) 0,4 А; в) 0,5 А; г) 0,6 А.

9. *(3 бали)* Три резистори з'єднані в електричне коло (рис. 3). Скільки теплоти виділиться в колі протягом 2 с, якщо сила струму в резисторі 1 дорівнює 1 А, а опір кожного резистора становить 2 Ом?
а) 1 Дж; б) 2 Дж; в) 6 Дж; г) 12 Дж.

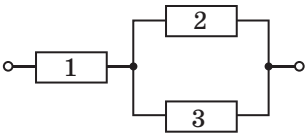


Рис. 3

10. *(3 бали)* Два резистори, що мають опори 3 і 6 Ом, з'єднані паралельно й підключені до джерела струму, напруга на затискачах якого дорівнює 12 В. Визначте потужність електричного струму в кожному резисторі та на всій ділянці.

11. *(4 бали)* Транспортер піднімає вантаж масою 300 кг на висоту 16 м протягом 2 хв. Визначте силу струму в електродвигуні транспортера, якщо напруга в мережі дорівнює 380 В, а ККД транспортера становить 60 %.

12. *(4 бали)* В електричний чайник, опір спіралі якого становить 110 Ом, налили 2 л води. Чайник увімкнули в електричну мережу напругою 220 В і за 0,5 хв вимкнули. На скільки градусів збільшилася температура води в чайнику, якщо ККД чайника становить 70 %?

13. *(4 бали)* Три резистори з'єднані так, як показано на рис. 4, і підключені до батареї гальванічних елементів. Напруга на затискачах батареї становить 12 В, опір кожного резистора дорівнює 6 Ом. Визначте потужність, яку споживає кожний резистор.

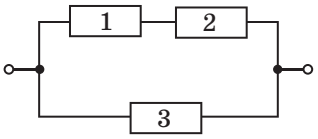


Рис. 4

14. *(4 бали)* Нікелювання металевої пластини здійснювалося за сили струму 0,89 А й тривало 1 год 36 хв. Визначте товщину шару нікелю, що вкрив пластину, якщо площа поверхні пластини становить 96 см^2.

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Від лейденських банок до суперконденсаторів

На XVIII–XIX ст. припадає низка винаходів, які в модернізованому вигляді дійшли до нашого часу. Так, вивчаючи вплив електричного поля на різні об'єкти, англійський учений *Майкл Фарадей* створив клітку у вигляді куба з ребром 4 м, покрив її стінки матеріалом, який є добрим провідником, та ізолював клітку від землі. На думку вченого, ця споруда повинна була надійно захищати дослідника від впливу електричного поля. Для перевірки ефективності пристрою вчений узяв надчутливий електроскоп і зайшов з ним до клітки. Ззовні асистенти створювали потужні електричні розряди, але електроскоп не зареєстрував наявності електричного заряду в клітці. Пристрій одержав назву *клітка Фарадея,* і зараз її аналог використовують для захисту від дії електромагнітних полів.

Кліткою Фарадея «навпаки» користується більшість із нас, розігріваючи їжу в мікрохвильовій печі. Металевий корпус печі та сітка, нанесена на скло дверцят, «не випускають» електромагнітні хвилі назовні.

Електричний заряд і пов'язана з ним енергія мають один дуже вагомий недолік — їх важко накопичувати. Ми всі знаємо «ємності для електрики» — батареї та акумулятори. Ще один пристрій для накопичення електричного заряду — *лейденська банка* (рис. 1), яка була створена в середині XVIII ст. у місті Лейден (Голландія).

Пристрій являє собою скляну банку, обклеєну зсередини й ззовні металевою фольгою. З'єднання із внутрішньою оболонкою здійснюється за допомогою металевого стрижня, закріпленого всередені банки. Щоб зарядити лейденську банку, слід торкнутися стрижня зарядженим тілом (при цьому банку необхідно тримати в руці — так зовнішня оболонка банки з'єднується із землею). Якщо здійснити цю операцію кілька разів, можна накопичити значний заряд (рис. 2).

Рис. 1

Рис. 2

Принцип дії лейденської банки покладено в основу конструкції, яка за ім'ям винахідника одержала назву *генератор Ван де Граафа* (рис. 3). Цей пристрій працює так. Усередину ізольованої кулі (1), виготовленої з провідника, введено стрічку (2) транспортера, яка перебуває в безперервному русі. Рухаючись, стрічка заряджається і передає заряд на кулю. Генератор Ван де Граафа є «серцем» деяких сучасних прискорювачів, які використовують для вивчення мікросвіту (рис. 4).

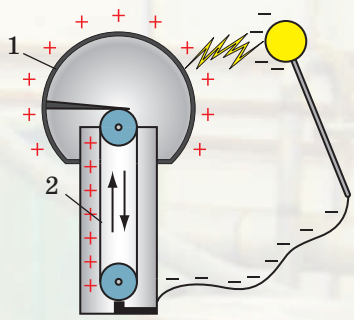


Рис. 3

А чи може лейденська банка стати в пригоді в повсякденному житті? Виявляється, так!

Відомо, що вага автомобільного акумулятора становить понад десять кілограмів, причому цей важкий пристрій працює на повну потужність усього кілька секунд — коли потрібно завести двигун. Інші потреби електричної системи автомобіля задовольняє генератор, а для живлення ламп на паркінгу досить і маленької батарейки. Навіщо ж возити зайві кілограми? Таке запитання поставили собі й інженери. На сьогодні вони вже винайшли спосіб суттєво зменшити розміри акумулятора, застосувавши *сучасний аналог лейденської банки — суперконденсатор* (рис. 5), енергія якого використовується тільки під час запускання двигуна. Розміри й вага суперконденсатора набагато менші від автомобільного акумулятора. Погодьтеся, різниця вражає!

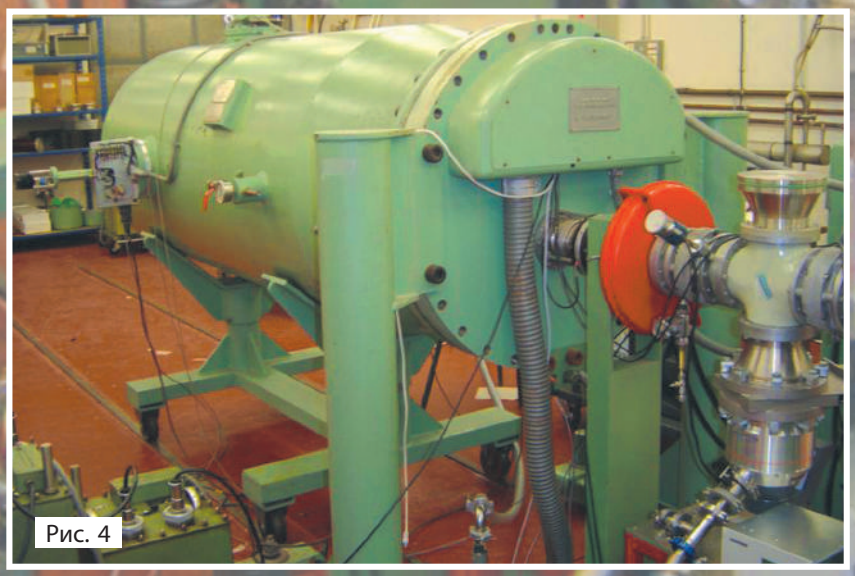


Рис. 4

Рис. 5

Орієнтовні теми проєктів

1. Електрика в житті людини.
2. Сучасні побутові та промислові електричні пристрої.
3. Застосування електролізу в практичній діяльності людини.
4. Застосування струму в газах у практичній діяльності людини.
5. Вплив електричного струму на організм людини.

Теми рефератів і повідомлень

1. З історії вивчення електричних явищ.
2. Статична електрика в нашому житті та в живій природі.
3. Електросмог навколо нас.
4. Георг Сімон Ом: історія життя.
5. Сучасні джерела живлення для електронних пристроїв.
6. Джерела електричного струму для космічних досліджень.
7. Застосування електрики в медицині.
8. Дія електричного струму на клітини рослин, живих істот.
9. Історія електричної лампи.
10. Азбука Морзе й електричний телеграф.
11. Основні правила монтажу освітлювальної та силової мереж.
12. Надпровідність: історія відкриття та перспективи застосування.
13. Історія електролізу.
14. Внесок українських учених у розвиток електрозварювання.
15. Як працює сенсорний екран.
16. Електричний струм у напівпровідниках.
17. Як було винайдено блискавковідвід.

Теми експериментальних досліджень

1. Створення електроскопа та дослідження електростатичних явищ.
2. Цікаві досліди з електростатики.
3. Візуалізація силових ліній електричного поля за допомогою солом'яних «стрілок», манної крупи, насіння фенхелю.
4. Створення різноманітних джерел живлення.
5. Вплив електричного поля на якість насіння та врожайність.
6. Дослідження електропровідності різних рідин.
7. Дослідження електропостачання квартири.

Перед початком роботи над проєктом, рефератом, проведенням експериментального дослідження уважно ознайомтеся з порадами в інтернет-підтримці підручника.

ДО ПРАКТИКУМІВ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Розділ 1. Теплові явища

1.1. Яка кількість теплоти виділяється під час охолодження 200 г олії на 10 °С?

1.2. Чайник місткістю 2 л наполовину заповнили водою за температури 20 °С. Яку кількість теплоти слід передати воді в чайнику, щоб нагріти її до 100 °С?

1.3. Нагрітий алюмінієвий кухоль масою 115 г передав навколишньому середовищу 2 кДж теплоти. До якої температури був нагрітий кухоль, якщо температура навколишнього середовища 25 °С?

1.4. За графіком залежності температури речовини масою 200 г, узятої у твердому стані, від кількості поглинутої нею теплоти (рис. 1) знайдіть питому теплоємність цієї речовини у твердому стані та питому теплоту плавлення речовини.

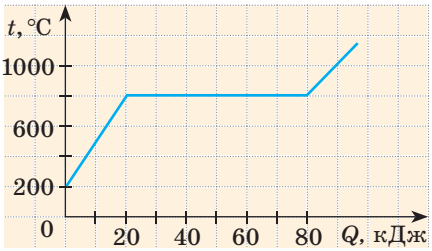


Рис. 1

1.5. Хлопчик зліпив невеликий сніжок і тримав його в руці доти, поки він не розтанув. Яку найменшу кількість теплоти було передано сніжку, якщо його маса дорівнювала 40 г і він містив 25 % води?

1.6. У залізну посудину з водою поклали шматок льоду масою 100 г за температури −10 °С. Яка температура встановиться в посудині, якщо маса посудини 200 г, маса води — 100 г, а початкова температура посудини і води була 10 °С?

1.7. Яку кількість теплоти потрібно передати рідкому ефіру масою 50 г, взятому за температури 35 °С, щоб повністю перетворити його на пару?

1.8. Рідка речовина масою 150 г перебуває під легкорухомим поршнем. За графіком залежності температури цієї речовини від кількості поглинутої нею теплоти (рис. 2) визначте питому теплоту пароутворення речовини.

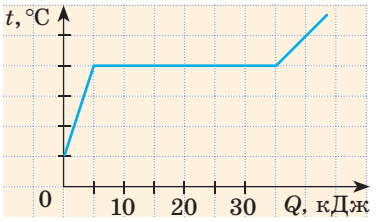


Рис. 2

1.9. Унаслідок повного згоряння торфу виділилося 225 МДж теплоти. Скільки торфу було спалено?

1.10. Сучасні спиртові горілки для туризму мають ККД близько 50 %. Скільки спирту було спалено, якщо турист нагрів 0,45 л води від 20 °С до кипіння?

1.11. Місткість паливного бака мінітрактора — 32 л, середня потужність його чотиритактного дизельного двигуна — 16,8 кВт, ККД двигуна — 30 %. Скільки часу може працювати мінітрактор без дозаправки?

Розділ 2. Електричні явища. Електричний струм

2.1. Два незаряджені електроскопи з'єднали металевим стрижнем (рис. 3, *а*). До електроскопа 1 піднесли скляну паличку, натерту об шовк (рис. 3, *б*). Не прибираючи палички, прибрали стрижень, а потім прибрали й паличку. Спираючись на відомі вам закони та явища, поясніть, чому після цього електроскопи виявилися зарядженими, та визначте знак заряду кожного електроскопа.

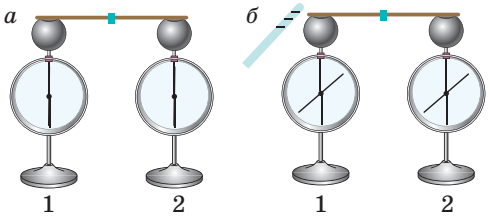


Рис. 3

2.2. Заряд невеликої кульки дорівнює 8 мкКл. Скільки надлишкових електронів міститься на цій кульці?

2.3. Три однакові провідні кулі зарядами $4q$, $-5q$, $7q$ з'єднали одну з одною, а потім роз'єднали. Визначте заряд кожної кулі після роз'єднання.

2.4. Відстань між двома точковими зарядами зменшили вдвічі, а кожний із зарядів збільшили в 3 рази. У скільки разів і як змінилася сила електростатичної взаємодії зарядів?

2.5. Дві однакові провідні намистини надіто на вертикальний непровідний стрижень. Нижня намистина закріплена, а верхня може ковзати вздовж стрижня без тертя. Після того як намистинам надали електричні заряди по 40 нКл, верхня намистина зупинилася на відстані 3 см від нижньої. Визначте масу намистин.

У задачах, поданих нижче, опорами з'єднувальних проводів знехтуйте, а вимірювальні прилади вважайте ідеальними.

2.6. Учень склав електричне коло з батареї гальванічних елементів, амперметра, ключа та резистора. Визначте, який заряд пройшов через поперечний переріз резистора протягом 1 хв, якщо показ амперметра 1,5 А.

2.7. Яку роботу виконує електричне поле з переміщення ділянкою кола заряду 0,5 Кл, якщо напруга на ділянці дорівнює 2,4 В?

2.8. Під час роботи кавоварки сила струму в її нагрівальному елементі дорівнює 5 А. Який опір нагрівального елемента, якщо напруга в мережі 220 В?

2.9. Площа поперечного перерізу ніхромового дроту — 0,44 мм^2. Якої довжини дріт слід взяти, щоб виготовити резистор опором 2 Ом?

2.10. Три резистори опорами 1,2 Ом, 4,8 Ом і 3 Ом з'єднали послідовно і приєднали до джерела живлення, напруга на виході якого дорівнює 4,5 В. Визначте силу струму в колі та напругу на кожному резисторі.

2.11. Для якісної роботи світлодіодної лампи напруга на ній має бути 2 В, а сила струму — 20 мА. Резистор якого опору слід приєднати послідовно до лампи, щоб її можна було живити від акумулятора, напруга на виході якого 12 В?

2.12. Дві електричні лампи опорами 24 Ом і 12 Ом з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, напруга на виході якого 24 В. Яка загальна сила струму в колі та сила струму в кожній лампі?

2.13. Два провідники при послідовному з'єднанні мають загальний опір 27 Ом, при паралельному з'єднанні — 6 Ом. Визначте опір кожного провідника.

2.14. Вісім однакових резисторів опорами 1 Ом кожен з'єднано в електричне коло (рис. 4). Загальна сила струму в колі 8 А. Яку напругу показує вольтметр?

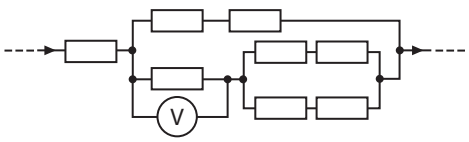


Рис. 4

2.15. Яку роботу виконає електричний струм силою 2 А протягом 10 хвилин, якщо напруга в колі 4,5 В?

2.16. Під час аварійної зупинки автомобіля 4 габаритні лампи потужністю 5 Вт кожна та 4 покажчики повороту з лампами потужністю 20 Вт кожна працюють одночасно. Яку загальну потужність споживають лампи? Якою є загальна сила струму в лампах і сила струму в кожній лампі, якщо під час зупинки лампи споживають енергію від акумулятора, напруга на виході якого дорівнює 12 В?

2.17. Срібло масою 120 кг повністю розплавили в електропечі за 20 хв. Яка потужність електропечі, якщо до початку плавлення срібло було нагріто до 950 °С?

ДОДАТОК*

Таблиця 1. Питома теплоємність c деяких речовин у різних агрегатних станах

Речовини у твердому стані

Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$
Алюміній	920	Латунь	400	Срібло	250
Графіт	750	Лід	2100	Сталь	500
Дерево (дуб)	2400	Мідь	400	Цегла	880
Залізо	460	Олово	230	Цинк	400
Золото	130	Свинець	140	Чавун	540

Речовини в рідкому стані

Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$
Алюміній	1080	Гелій	4190	Олія	1700
Вода	4200	Ефір	2350	Ртуть	140
Гас	2100	Залізо	830	Спирт	2500

Речовини в газоподібному стані (за умови незмінного тиску)

Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$	Речовина	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$
Водень	14 300	Вуглекислий газ	830	Кисень	920
Водяна пара	2200	Гелій	5210	Повітря	1000

Таблиця 2. Температура t плавлення і кристалізації деяких речовин (за нормального атмосферного тиску)

Речовина	t, °C	Речовина	t, °C	Речовина	t, °C
Алюміній	660	Мідь	1087	Спирт	–115
Водень	–256	Нафталін	80	Срібло	962
Вольфрам	3387	Олово	232	Сталь	1400
Залізо	1535	Парафін	55	Титан	1660
Золото	1065	Ртуть	–39	Цинк	420
Лід	0	Свинець	327	Чавун	1200

* Дані в таблицях наведені з досить невисокою точністю. Щоб навчитися розв'язувати задачі, такої точності цілком достатньо. Проте зверніть увагу на те, що для наукових та інженерних розрахунків часто потрібно знати значення величин до десяти значущих цифр, а інколи навіть і більше!

Таблиця 3. Питома теплота плавлення λ деяких речовин*

Речовина	λ, кДж/кг	Речовина	λ, кДж/кг	Речовина	λ, кДж/кг
Алюміній	393	Мідь	213	Ртуть	12
Вольфрам	185	Нікель	300	Свинець	25
Залізо	270	Олово	59	Спирт	105
Золото	67	Парафін	150	Срібло	87
Лід	332	Платина	113	Сталь	84

Таблиця 4. Температура кипіння $t_{кип}$ деяких речовин*

Речовина	$t_{кип}$, °С	Речовина	$t_{кип}$, °С	Речовина	$t_{кип}$, °С
Вода	100	Залізо	2750	Олія	310
Водень	–253	Кисень	–183	Ртуть	357
Гліцерин	290	Мідь	2567	Свинець	1740
Ефір	35	Молоко	100	Спирт	78

Таблиця 5. Питома теплота пароутворення r деяких речовин* (за температури кипіння)

Речовина	r, МДж/кг	Речовина	r, МДж/кг	Речовина	r, МДж/кг
Азот	0,2	Вода	2,3	Ртуть	0,3
Аміак	1,4	Ефір	0,4	Спирт	0,9

Таблиця 6. Питома теплота згоряння q деяких видів палива

Паливо	q, МДж/кг	Паливо	q, МДж/кг	Паливо	q, МДж/кг
Антрацит	30	Дизельне паливо	42	Пропан	46
Бензин	46	Дрова сухі	10	Солома	14
Буре вугілля	12	Кам'яне вугілля	27	Спирт	27
Водень	120	Нафта	44	Сухе паливо	30
Гас	46	Порох	4	Торф	15
Деревне вугілля	34	Природний газ	44	Тротил	15

* За нормального атмосферного тиску — 760 мм рт. ст.

Таблиця 7. Питомий електричний опір ρ деяких речовин (за температури 20 °С)

Речовина	ρ, $\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	Речовина	ρ, $\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	Речовина	ρ, $\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$
Алюміній	0,028	Нікелін (сплав)	0,42	Вода дистильована	$10^9 – 10^{10}$
Вольфрам	0,055	Ніхром (сплав)	1,1	Вода морська	$3 \cdot 10^5$
Графіт	13	Олово	0,12	Гума	$10^{17} – 10^{18}$
Залізо	0,10	Платина	0,10	Деревина суха	$10^{15} – 10^{16}$
Золото	0,024	Ртуть	0,96	Ебоніт	$10^{18} – 10^{20}$
Константан (сплав)	0,50	Свинець	0,21	Повітря	$10^{21} – 10^{24}$
Латунь (сплав)	0,07–0,08	Срібло	0,016	Порцеляна	10^{19}
Манганін (сплав)	0,43	Сталь	0,10–0,13	Скло	$10^{15} – 10^{19}$
Мідь	0,017	Фехраль (сплав)	1,3	Слюда	$10^{17} – 10^{21}$

Таблиця 8. Електрохімічні еквіваленти k, $\frac{мг}{Кл}$

Алюміній (Al^{3+})	0,09	Мідь (Cu^{+})	0,66	Срібло (Ag^{+})	1,12
Водень (H^{+})	0,01	Мідь (Cu^{2+})	0,33	Хлор (Cl^{-})	0,37
Залізо (Fe^{3+})	0,19	Натрій (Na^{+})	0,24	Хром (Cr^{3+})	0,18
Кисень (O^{2-})	0,08	Нікель (Ni^{2+})	0,30	Цинк (Zn^{2+})	0,34

Таблиця 9. Густина ρ деяких речовин (за температури 15–20 °С)

Речовини у твердому стані

Речовина	ρ, кг/м³	ρ, г/см³	Речовина	ρ, кг/м³	ρ, г/см³
Алюміній	2700	2,70	Парафін	900	0,90
Залізо	7800	7,80	Платина	21 500	21,50
Золото	19 300	19,30	Порцеляна	2300	2,30
Іридій	22 400	22,40	Свинець	11 300	11,30
Латунь	8500	8,50	Скло	2500	2,50
Лід	900	0,90	Сосна суха	440	0,44
Мармур	2700	2,70	Срібло	10 500	10,50
Мідь	8900	8,90	Сталь	7800	7,80
Нікель	8900	8,90	Цинк	7100	7,10
Олово	7300	7,30	Чавун	7000	7,00

Закінчення таблиці 9

Речовини в рідкому стані

Речовина	ρ, кг/м³	ρ, г/см³	Речовина	ρ, кг/м³	ρ, г/см³
Бензин	710	0,71	Мед	1420	1,42
Вода чиста	1000	1,00	Олія	900	0,90
Гас	800	0,80	Нафта	800	0,80
Дизельне паливо	840	0,84	Ртуть	13 600	13,60
Мастило	900	0,90	Спирт	800	0,80

Таблиця 10. Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць

Префікс	Символ	Множник	Префікс	Символ	Множник
тера-	Т	10^{12}	санти-	с	10^{-2}
гіга-	Г	10^{9}	мілі-	м	10^{-3}
мега-	М	10^{6}	мікро-	мк	10^{-6}
кіло-	к	10^{3}	нано-	н	10^{-9}
гекто-	г	10^{2}	піко-	п	10^{-12}
деци-	д	10^{-1}	фемто-	ф	10^{-15}

Визначаємо абсолютну та відносну похибки результату вимірювання

Абсолютна похибка результату вимірювання — *це відхилення результату вимірювання від істинного значення фізичної величини.*

Абсолютна похибка результату вимірювання показує, на скільки якнайбільше може помилитися дослідник, правильно вимірюючи фізичну величину.

Визначити абсолютну похибку результату вимірювання непросто. Потрібен аналіз методу вимірювання, якості вимірювального приладу, умов досліду, знання вищої математики тощо. Тому поки що домовимося: *під час одного прямого вимірювання абсолютна похибка дорівнюватиме ціні поділки шкали вимірювального приладу.*

Для запису значення абсолютної похибки використовують символ Δ (дельта), поряд наводять символ вимірюваної фізичної величини. Наприклад, запис $\Delta V = 2$ см³ означає, що абсолютна похибка результату вимірювання об'єму становить 2 см³.

Відносна похибка результату вимірювання *дорівнює відношенню абсолютної похибки до виміряного значення фізичної величини.*

Відносну похибку позначають символом ε (епсилон) і найчастіше подають у відсотках. Наприклад, у результаті вимірювання довжини олівця учнівською лінійкою (ціна поділки 1 мм) отримали результат 122 мм. У цьому випадку відносна похибка результату вимірювання довжини олівця становить:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\,\% = \frac{1\text{ мм}}{122\text{ мм}} \cdot 100\,\% \approx 0{,}8\,\%.$$

Іноді відносну похибку експериментальної перевірки рівності типу $X = Y$ розраховують за формулою $\varepsilon = \left|1 - \frac{X}{Y}\right| \cdot 100\,\%$.

ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ, ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ, ЗАДАЧ ДО ПРАКТИКУМІВ

Розділ І «Теплові явища»

Частина 1. Температура. Внутрішня енергія. Теплопередача

№ 1. **2.** Рідина. **3.** Інакше термометр змінить температуру тіла. **5.** а) 1 °С, 22 °С; б) 5 °С, 15 °С. **№ 2.** **1.** а, б. **2.** ↑, оскільки ↑ відстань між атомами і молекулами. **3.** Об'єм ↑, маса не змінилась, густина ↓, середня швидкість руху частинок ↑. **4.** За температури нижче 0 °С вода перетвориться на лід, а за температури від 0 до 4 °С стовпчик термометра опускатиметься. **5.** Зі зміною температури змінюються розміри деталей приладу, тому точність приладу знижується. **6.** Скляна банка може тріснути; внутрішні шари скла розширяться сильніше, ніж зовнішні. **7.** Потенціальна → кінетична; переходить в енергію теплового руху атомів і молекул. **№ 3.** **1.** Ні. **2.** Внутрішня енергія не змінюється, кінетична ↓, потенціальна ↑. **3.** Заходите в будинок — внутрішня енергія ↑, механічна не змінюється; піднімаєтеся — внутрішня енергія не змінюється, механічна (потенціальна) ↑; прискорюєте рух — внутрішня енергія не змінюється, механічна (кінетична) ↑. **4.** Внутрішня енергія ↑, механічна (потенціальна) ↓. **5.** 1–Д, 2–А, 3–Г, 4–В. **№ 4.** **1.** Йдеться про два способи зміни внутрішньої енергії рук: здійснення роботи й теплопередача. **2.** а) потерти головку сірника о коробку; б) запалити в полум'ї. **3.** Щоб не отримати опіків через тертя рук о поверхню каната. **4.** Ні. **5.** Так, може. **№ 5.** **1.** Шуба не гріє, а погано проводить тепло. **2.** Повітря між рамами погано проводить тепло. **3.** Солома погано проводить тепло та заважає потраплянню сонячних променів. **4.** Сніг погано проводить тепло і захищає рослини від низьких температур. **5.** Більш висока теплопровідність металів порівняно з деревом спричиняє те, що метали швидше відводять тепло від руки або передають їй тепло. Тому за температури, яка нижча від вашої власної, метали здаватимуться холоднішими, ніж дерево, а за температури, яка вища за вашу власну, — теплішими. За температури, яка дорівнює вашій власній, і металеві, і дерев'яні предмети будуть здаватися нагрітими однаково. **6.** Під час ↑ температури куля буде підніматися, під час ↓ — опускатися. **№ 6.** **1.** Температура язиків полум'я більша за температуру навколишнього повітря. **2.** Вода погано проводіть тепло, а конвекція відсутня. **3.** Щоб нагріти — над нагрівником, щоб охолодити — під льодом. **4.** Хмари «тримаються» конвекційними потоками повітря. **6.** У балоні; на 2 кПа. **№ 7.** **1.** Тіла з темною поверхнею краще випромінюють тепло. **2.** У білий або сріблястий. **3.** Тіла з темною поверхнею краще поглинають тепло. **4.** Сонячного дня. **5.** Відсутність повітря спричиняє відсутність теплопровідності та конвекції, а дзеркальна поверхня заважає передачі тепла випромінюванням. **6.** Повітря нагрівається від поверхні Землі; зокрема, від кольору поверхні. **7.** Маса, m, кг; температура, t, °С; густина, ρ, кг/м^3; кількість теплоти, Q, Дж. **№ 8.** **1.** Щоб нагріти 1 кг срібла на 1 °С, слід передати йому 250 Дж теплоти. **2.** Вода має найбільшу теплоємність, тому, охолоджуючись, вона віддає навколишньому середовищу значну кількість теплоти. **3.** 1,2 кДж. **4.** Зі сталі. **5.** Ні. **6.** 540,8 кДж. **7.** 10,5 м. **№ 9.** **1.** 16 л. **2.** 70 °С. **3.** 130 °С. **4.** $250\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°С}}$.

Частина 2. Зміна агрегатного стану речовини. Теплові двигуні

№ 10. 1. в. **2.** Молекули не змінились, відстань між ними ↑. У воді молекули здебільшого коливаються біля положень рівноваги, час від часу переміщуючись рідиною. У парі молекули води рухаються ламаними траєкторіями, змінюючи напрямок руху під час зіткнень. **3.** Ні; газ займе весь наданий об'єм. **4.** Ні; над поверхнею води є водяна пара. **5.** Ні; бачимо туман — дуже маленькі краплинки води. **7.** а, г. **№ 11. 1.** Вольфрам має високу температуру плавлення. **2.** *A* — твердому, *B* — рідкому, *C* — рідкому, *D* — частина речовини ще перебуває в рідкому стані, частина — вже в рідкому. **3.** 1 — нафталін, 2 — вода; більшу температуру плавлення має нафталін; нафталін на початку досліду мав вищу температуру. **4.** Якщо температура навколишнього середовища менша від 0 °С — вода замерзатиме; більша за 0 °С — лід танутиме; 0 °С — ані лід, ані вода не будуть змінювати свого стану. **6.** а, б, в, д. **№ 12. 1.** 106,5 кДж. **2.** 1 кг розплавленого алюмінію; на 393 кДж. **3.** 78,4 МДж. **4.** ≈10,1 кДж. **5.** 79 °С. **6.** Вищу температуру плавлення — 1; більшу питому теплоту плавлення — 2; більшу теплоємність — 2. **7.** 0,12. **8.** Так, зменшиться. **№ 13. 1.** У теплу; середня кінетична енергія молекул є більшою. **2.** Спирт швидше випаровується. **3.** Під час випаровування вода поглинає енергію. **4.** Потові залози собаки розташовані лише на язиці, внаслідок випаровування води тварина охолоджується. **5.** Бачимо туман: водяна пара, яку містить повітря, що ми видихаємо, конденсується. **6.** Сніг тане, отримана вода випаровується, а потім конденсується в холодному повітрі. **№ 14. 1.** Зі ↑ висоти атмосферний тиск ↓, тому температура кипіння води ↓. **2.** Внутрішня енергія 1 кг водяної пари за температури 100 °С більша за внутрішню енергію 1 кг води за тієї самої температури на 2,3 МДж. **3.** 23 МДж. **4.** Під час конденсації водяної пари виділяється енергія. **5.** 30,52 МДж. **6.** Ні; для підтримання кипіння потрібна енергія, а теплообмін не відбувається. **№ 15. 1.** Порох згоряє швидше. **2.** 270 МДж. **3.** 2 г. 4. 35 %. **5.** 100 °С, частина води перетвориться на пару. **6.** Частина енергії витрачається на випаровування. **7.** 1–Б, 2–В, 3–Г, 4–Д. **№ 16. 1.** 25 %. **2.** 33,3 %. **3.** 65,32 МДж. **4.** 11,5 кВт. **№ 17. 1.** Хімічна енергія, «схована» в паливі, → внутрішня енергія пари → кінетична енергія обертального руху турбіни → електрична енергія. На кожному етапі частина енергії передається довкіллю. **2.** 45,5 %. **3.** Над сумішшю виконують роботу, тому її внутрішня енергія ↑, а отже, ↑ температура. **4.** Пара виконала роботу, тому її внутрішня енергія ↓, а отже, ↓ температура.

Завдання для самоперевірки до розділу I

Частина 1

1. г. **2.** б. **3.** б. **4.** а. **5.** а. **7.** в. **9** а, б. **6.** Темний одяг краще поглинає сонячне випромінювання. **8.** І ватяний халат, і шуба погано проводять тепло, адже між ворсинками міститься багато повітря; мешканець Півночі не віддає багато тепла навколишньому середовищу, а мешканець пустелі — не отримує. **10.** 369 кДж. **11.** 5,1 кДж. **12.** На 600 °С. **13.** На 50,4 °С. **14.** 43,75 м. **15.** 5 °С.

Частина 2

1. г. **2.** г. **3.** в. **4.** а. **5.** б. **6.** в. **7.** г. **8.** в. **9.** 1–В, 2–А, 3–Б. **10** в. **11.** У легенях активно випаровується вода, і на цей процес витрачається досить велика енергія. **12.** У ході стискання над сумішшю здійснюється робота, тому її внутрішня енергія ↑, а отже, ↑ температура; під час робочого ходу газ, розширюючись,

виконує роботу, тому його внутрішня енергія ↓. **13.** 75 %. **14.** 8,94 кДж. **15.** 250 °С. **16.** 1,95 г. **17.** 40,3 кВт, 1 кН.

Розділ ІІ «Електричні явища. Електричний струм»

Частина 1. Електричний заряд. Електричне поле. Електричний струм

№ 19. **1.** 1 — позитивний, 2 — негативний. **2.** Потерти паличку об вовну (паличка набуде негативного заряду) і піднести її до кульки. Якщо кулька відштовхнеться, то вона заряджена негативно, якщо притягнеться — заряджена позитивно. **3.** 10. **4.** $6{,}25 \cdot 10^{18}$. **6.** Сила тяжіння; 50 мН; вертикально вниз. **№ 20.** **1.** Між 3 і 4; 1 і 3 заряджені позитивно, 2 і 4 — негативно. **2.** 1) Починаються в нескінченності, закінчуються на негативному заряді (*а*), починаються на позитивному заряді, закінчуються на негативному (*б*); 2) на обох рисунках той, що праворуч. **3.** 32 мкН; верхня пластина заряджена позитивно, нижня — негативно. **4.** 32 мН. **6.** Може, втратила 5 електронів; не може; може, втратила 15 електронів. **№ 21.** **1.** Маса позитивно зарядженої палички менша. **2.** Може, якщо передати електроскопу такий самий за модулем, але протилежний за знаком заряд. **3.** Заряджена позитивно. **4.** $q_1 = q_2 = 3 \cdot 10^{-9}$ Кл. **5.** Спочатку заземлити незаряджену кульку та піднести до неї, не торкаючись, заряджену — перша кулька набуде позитивного заряду. Потім прибрати заземлення та повторити дослід із кулькою, зарядженою позитивно, і ще з однією незарядженою кулькою — остання набуде негативного заряду. **№ 22.** **1.** *а* — сили відштовхування; *б* — сили притягання. **2.** ↑ в 4 рази. **3.** ↑ у 3 рази. **4.** 3,6 мкН. **5.** 0,625 мкН. **6.** Сильніше у випадку *а*: заряди не є точковими, і в кульках відбудеться перерозподіл зарядів. **7.** 1–Б, 2–Д, 3–В, 4–А. **№ 23.** **2.** Має бути діелектриком. **3.** Вологе повітря є провідником. **4.** Метал є провідником; щоб заряд не перетікав на руку дослідника; другий електроскоп залишиться незарядженим. **5.** Рухаються хаотично. **7.** 1) *А* — негативного, *Б* — позитивного; 2) а) залишаться, б) не залишаться. **№ 24.** **3.** Повітря в каналі блискавки нагрівається (струм чинить теплову дію) і різко розширюється. **5.** 18 кг. **№ 25.** **1.** а) Електрична енергія → хімічна енергія; б) хімічна енергія → електрична енергія. **2.** З'єднати один електроскоп із негативним полюсом джерела струму, а інший — з позитивним. **3.** Механічна енергія → електрична енергія. **4.** Ні. **6.** ≈84,8 тис. т. **№ 26.** **6.** Час, t, секунда (с); сила, F, ньютон (Н); електричний заряд, q, кулон (Кл); механічна робота, A, джоуль (Дж). **№ 27.** **2.** 2 хв. **3.** Струму не буде; $I = 0$. **4.** 180 Кл. **5.** 3,2 А. **№ 28.** **1.** а) 1 В, 4 В; б) 0,5 В, 6 В; в) 1 В, 7 В. **3.** 40 В. **4.** 12 В. **5.** 396 кДж. **7.** 2,5 кН/м; не залежіть. **№ 29.** **1.** 15 Ом. **2.** $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 2{,}5$ Ом; $R_3 = 4$ Ом; $R_4 = 8$ Ом. **3.** 225 В. **5.** 60 Ом. **6.** 0,25 А. **7.** Не залежіть. **8.** 28 г. **№ 30.** **1.** 1 — з міді, 2 — із заліза, 3 — зі свинцю. **2.** 5 мОм. **3.** Опір ↓; сила струму ↑. **4.** 2 м. **5.** ↓ в 4 рази. **6.** 1,08 кг. **№ 31.** **1.** 4 Ом; 2 В; 1 В, 1 В. **2.** 35 Ом. **3.** 48 В. **4.** 250 Ом. **5.** 0,2 А; 5,6 В. **6.** Можна. **7.** 3,6 кОм. **8.** Потенціальна енергія → кінетична, внутрішня енергії; 2,4 Дж, 1,68 Дж; 4,08 Дж. **№ 32.** **2.** 144 В. **3.** 0,6 А; 0,4 А; 1 А. **4.** У срібному. **5.** 10 Ом; 0,4 А. **6.** 2,3 В. **7.** K_2; 0,4 А. **8.** 9 опорів (10 різних з'єднань): $4R_0$; $R_0/4$; R_0; $4R_0/3$; $3R_0/4$; $5R_0/2$; $2R_0/5$; $5R_0/3$; $3R_0/5$. **9.** 17,5 мОм.

Частина 2. Робота і потужність електричного струму. Електричний струм у різних середовищах

№ 33. **1.** 876 кВт·год; 1471 грн 68 к. **4.** 7,2 кДж. **5.** а) 300 кДж, 120 кДж; б) 24,5 кДж, ≈61,2 кДж. **6.** 12,5 А. **7.** Під час паралельного з'єднання; в 4 рази.

9. 1–Г, 2–Б, 3–Д, 4–А. **№ 34. 1.** 288 кДж. **2.** 5 кДж; 2,5 кДж. **3.** Опір проводів значно менший за опір нитки розжарення, а сила струму в нитці та підвідних проводах є однаковою. **4.** 120,4 В. **5.** 47 °С; 33,5 °С. **6.** ≈9,25 м. **7.** $Q_м/Q_{св}=9,5$. **№ 35. 1.** 1,32 кВт. **2.** У місцях з'єднання найбільший опір, тому (за законом Джоуля — Ленца) виділяється найбільша кількість теплоти. **3.** Має бути легкоплавкою, мати малу питому теплоту плавлення. **4.** Площа поперечного перерізу дроту в освітлюваному шнурі є малою (шнур розрахований на невелику силу струму), тому опір досить великий. За сили струму 100 А в шнурі виділиться величезна кількість теплоти й шнур займеться. **6.** а, в. **№ 36. 1.** Протилежно напрямку силових ліній поля. **2.** а. **3.** Зі зменшенням площі поперечного перерізу збільшується опір і (за законом Джоуля — Ленца) виділяється більша кількість теплоти; тонке місце нагрівається й видовжується швидше. У момент увімкнення опір нитки розжарення найнижчий, тому за тієї самої напруги виділяється найбільша кількість теплоти. **4.** 0,5 мм/с. **5.** а) $+3,2\cdot10^{-19}$ Кл; б) $-1,6\cdot10^{-19}$ Кл. **№ 37. 2.** У звичайній воді багато домішок, які розпадаються на йони. **3.** Сіль має йонну кристалічну ґратку, а цукор — ні. **4.** 12 год 24 хв. **5.** 40,32 г. **6.** 4 кВт. **8.** 2,31 г. **№ 38. 1.** 1) Електролітична ванна з розчином $AgNO_3$, два електроди, амперметр, батарея акумуляторів, ключ, з'єднувальні проводи; 2) праворуч — анод, ліворуч — катод; 3) на катоді; 4) 1,4 А; 5) 8 хв 20 с; 6) 24,75 кДж. **2.** 2 мкм. **3.** 5 год. **4.** 32 МДж. **5.** Провідники: 2, 4, 5, 6; діелектрики: 1, 3, 7, 8. **№ 39. 1.** Силові лінії поля починаються на позитивно зарядженій пластині, закінчуються на негативно зарядженій; електрони та негативні йони рухаються до позитивно зарядженої пластини, позитивні йони — до негативно зарядженої; рух нейтральних частинок хаотичний. **2.** Рекомбінація буде відбуватися частіше, йонізація — рідше. **3.** Електролітична дисоціація не супроводжується виникненням вільних електронів, для її протікання не потрібен йонізатор; речовина розпадається на йони різних елементів. **4.** Струм у металах не супроводжується хімічними реакціями; носії заряду — вільні електрони, а не йони.

Завдання для самоперевірки до розділу II

Частина 1

1. а. **2.** б. **3.** в. **4.** 1–В, 2–А, 3–Д, 4–Г. **5.** 1–Б, 2–Д, 3–В, 4–А. **6.** г. **7.** а. **8.** 1–Б, 2–В, 3–Г, 4–А. **9.** 1–В, 2–А, 3–Б. **10.** Заземлити незаряджену кульку та наблизити її до зарядженої. **11.** ↑ у 4 рази. **12.** 0,2 А; 0,6 В; 1,2 В. **13.** 4 А. **14.** 10 мкН. **15.** 6 В; 9 В. **16.** Показ вольтметра V_1 не зміниться; V_2 — ↑; V_3 — ↓; показ амперметра А ↑.

Частина 2

1. в. **2.** г. **3.** 1–Д, 2–Б, 3–А, 4–В. **4.** в. **5.** г. **6.** в. **7.** а. **8.** в. **9.** в. **10.** 24 Вт; 48 Вт; 72 Вт. **11.** 1,75 А. **12.** На 1,1 °С. **13.** 6 Вт; 6 Вт; 24 Вт. **14.** 18 мкм.

До практикумів із розв'язування задач

Розділ 1. Теплові явища. **1.1.** 3,4 кДж. **1.2.** 336 кДж. **1.3.** ≈44 °С. **1.4.** ≈167 Дж/(кг·°С); 30 кДж/кг. **1.5.** 9,96 кДж. **1.6.** 0 °С. **1.7.** 20 кДж. **1.8.** 200 кДж/кг. **1.9.** 15 кг. **1.10.** 11,2 г. **1.11.** 5 год 36 хв.

Розділ 2. Електричні явища. Електричний струм. **2.1.** 1 – позитивний, 2 – негативний. **2.2.** $5\cdot10^{13}$. **2.3.** $2q$. **2.4.** Збільшилась у 36 разів. **2.5.** 1,6 г. **2.6.** 90 Кл. **2.7.** 1,2 Дж. **2.8.** 44 Ом. **2.9.** 80 см. **2.10.** 0,5 А; 0,6 В; 2,4 В; 1,5 В. **2.11.** 500 Ом. **2.12.** 3 А; 1 А; 2 А. **2.13.** 18 Ом; 9 Ом. **2.14.** 4 В. **2.15.** 5,4 кДж. **2.16.** 100 Вт; ≈ 8,3 А; ≈ 0,4 А; ≈ 1,7 А. **2.17.** 9 кВт.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

А Агрегатний стан 44
Ампер 142
Амперметр 143
Анод 200
В Випаровування 60
Випромінювання 31
Вольт 146
Вольт-амперна характеристика 151
Вольтметр 147
Г Газовий розряд 209
— несамостійний 209
— самостійний 210–216
Гальванічний елемент 132
Гальванометр 132
Гальванопластика 205
Гальваностегія 205
Д Двигун внутрішнього згоряння 83
Джерела електричного струму 131
Діелектрики 125
Е Електризація 103, 112, 115
Електрична схема 137
Електричне коло 136
Електричне поле 107
Електричний струм 124
Електроліз 201
Електроліти 200
Електролітична дисоціація 199
Електромагнітна взаємодія 102
Електроскоп 116
Електростатична індукція 115
Електрохімічний еквівалент 201, 231
Енергія внутрішня 16
З Заземлення 114
Закон
— Джоуля — Ленца 186
— збереження електричного заряду 113
— Кулона 121
— Ома для ділянки кола 152
— Фарадея для електролізу 201
Запобіжник 191
Заряд електричний 103
З'єднання провідників
— мішане 174
— паралельне 170
— послідовне 162
Й Йонізація 209
К Катод 200
Кипіння 67
Кількість теплоти 19
Коефіцієнт корисної дії
— нагрівника 76
— теплового двигуна 80
Конвекція 26
Конденсація 63
Кристалізація 52
Кулон 103, 143
Н Надпровідність 196
Напруга електрична 146
О Ом 151
Опір електричний 151
П Паливо 73
Пароутворення 60
Питома теплоємність 34, 229
Питома теплота згоряння палива 74, 230
Питома теплота пароутворення 68, 230
Питома теплота плавлення 56, 230
Питомий опір 155, 231
Плавлення 51
Поляризація 115
Потужність струму 181
Провідники 125
Р Рафінування 204
Реостат 156
Рівняння теплового балансу 37
Робота струму 180
С Сила
— Кулона 121
— струму 141
Силові лінії електричного поля 109
Т Температура 7, 8
— кипіння 67, 230
— плавлення та кристалізації 51, 229
Теплова рівновага 7
Теплове розширення 12
Тепловий двигун 79
Теплопередача 19
Теплопровідність 23
Турбіна парова 83
Ш Шкала температурна
— Кельвіна 9
— Цельсія 9

ЗМІСТ

Передмова 3

Розділ I. Теплові явища

Частина 1. Температура. Внутрішня енергія. Теплопередача

§ 1. Тепловий стан тіл. Температура та її вимірювання. 6
§ 2. Залежність розмірів фізичних тіл від температури. 11
§ 3. Внутрішня енергія 16
§ 4. Способи зміни внутрішньої енергії 19
§ 5. Теплопровідність. 22
§ 6. Конвекція 26
§ 7. Випромінювання. 30
§ 8. Питома теплоємність речовини. Кількість теплоти, що поглинається речовиною під час нагрівання або виділяється під час охолодження . . . 33
§ 9. Тепловий баланс 37
Лабораторна робота № 1 40
Лабораторна робота № 2 41

Частина 2. Зміна агрегатного стану речовини. Теплові двигуни

§ 10. Агрегатний стан речовини 44
§ 11. Плавлення та кристалізація 51
§ 12. Питома теплота плавлення 56
§ 13. Випаровування та конденсація 60
§ 14. Кипіння. Питома теплота пароутворення. 66
§ 15. Теплота згоряння палива. Коефіцієнт корисної дії нагрівника 72
§ 16. Принцип дії теплових двигунів. ККД теплового двигуна 79
§ 17. Деякі види теплових двигунів 82
§ 18. Теплоенергетика. Способи збереження енергетичних ресурсів 87

Підбиваємо підсумки розділу I 92
Завдання для самоперевірки до розділу I 94
Енциклопедична сторінка. 98
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень. Теми експериментальних досліджень 100

Розділ II. Електричні явища. Електричний струм

Частина 1. Електричний заряд. Електричне поле. Електричний струм

§ 19. Електричний заряд та електромагнітна взаємодія 102
§ 20. Електричне поле 106
§ 21. Механізм електризації. Електроскоп 112
§ 22. Закон Кулона 119
§ 23. Електричний струм. Електрична провідність матеріалів 123
§ 24. Дії електричного струму 127
§ 25. Джерела електричного струму. 130
§ 26. Електричне коло та його елементи 135
§ 27. Сила струму. Одиниця сили струму. Амперметр. 141
§ 28. Електрична напруга. Одиниця напруги. Вольтметр 146
§ 29. Електричний опір. Закон Ома 150
§ 30. Розрахунок опору провідника. Питомий опір речовини. Реостати 154
Лабораторна робота № 3 160

§ 31. Послідовне з'єднання провідників 162
Лабораторна робота № 4 168
§ 32. Паралельне з'єднання провідників 170
Лабораторна робота № 5 177

Частина 2. Робота і потужність електричного струму. Електричний струм у різних середовищах

§ 33. Робота і потужність електричного струму 179
§ 34. Теплова дія струму. Закон Джоуля — Ленца 186
§ 35. Електричні нагрівальні пристрої. Запобіжники 190
§ 36. Електричний струм у металах 194
§ 37. Електричний струм в електролітах 198
§ 38. Застосування електролізу 204
§ 39. Електричний струм у газах 208
§ 40. Види самостійних газових розрядів 213
Підбиваємо підсумки розділу II 218
Завдання для самоперевірки до розділу II 220
Енциклопедична сторінка 224
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень. Теми експериментальних досліджень 226
До практикумів із розв'язування задач 227
Додаток
Таблиця 1. Питома теплоємність деяких речовин у різних агрегатних станах 229
Таблиця 2. Температура плавлення і кристалізації деяких речовин 229
Таблиця 3. Питома теплота плавлення деяких речовин 230
Таблиця 4. Температура кипіння деяких речовин 230
Таблиця 5. Питома теплота пароутворення деяких речовин 230
Таблиця 6. Питома теплота згоряння деяких видів палива 230
Таблиця 7. Питомий електричний опір деяких речовин 231
Таблиця 8. Електрохімічні еквіваленти 231
Таблиця 9. Густина деяких речовин 231
Таблиця 10. Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць . . 232
Визначаємо абсолютну та відносну похибки результату вимірювання . . . 232
Відповіді до вправ, завдань для самоперевірки, задач до практикумів 233
Алфавітний покажчик 237

Рубрика «Фізика і техніка в Україні»: Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Вєркіна (10), Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля (25), Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова (50), М. П. Авенаріус (65), Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича (78), Виробниче об'єднання «Південмаш» і конструкторське бюро «Південне» (82), Інститут технічної теплофізики НАНУ (91), Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (106), Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (118), Інститут електродинаміки НАНУ (140), Інститут термоелектрики НАНУ і МОНУ (185), Львівський національний університет ім. Івана Франка (194), Л. В. Шубников (198), Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ (212).

Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчальний рік	Стан підручника	
			на початку року	у кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

Навчальне видання

БАР'ЯХТАР Віктор Григорович
ДОВГИЙ Станіслав Олексійович
БОЖИНОВА Фаїна Яківна
КІРЮХІНА Олена Олександрівна

«ФІЗИКА»

Підручник для 8 класу закладів загальної середньої освіти
За редакцією Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О.

2-ге видання, перероблене

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України

Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено

Підручник відповідає Державним санітарним нормам і правилам
«Гігієнічні вимоги до друкованої продукції для дітей»

Провідний редактор *І. Л. Морєва*. Редактор *Ю. М. Миронова*.
Художнє оформлення *В. І. Труфена*. Технічний редактор *С. О. Петрачков*.
Комп'ютерна верстка *С. В. Яшиша*. Коректор *В. П. Нестерчук*

Підписано до друку 27.05.2021 р. Формат 70×100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Шкільна. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 19,50. Обл.-вид. арк. 20,9.
Наклад 429 517 пр. Зам. 3106-2021.

ТОВ Видавництво «Ранок»,
вул. Кібальчича, 27, к. 135, Харків, 61071.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5215 від 22.09.2016.
Адреса редакції: вул. Космічна, 21а, Харків 61165.
E-mail: office@ranok.com.ua. Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

Підручник надруковано на папері українського виробництва

Надруковано у друкарні ТОВ «ТРІАДА-ПАК»,
пров. Сімферопольський, 6, Харків 61052.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5340 від 15.05.2017.
Тел. +38 (057) 712-20-00. E-mail: sale@triada.kharkov.ua

ЩО НЕОБХІДНО ЗНАТИ

Про фізичне явище і процес

1) зовнішні ознаки, умови, за яких воно (він) відбувається;
2) зв'язок з іншими явищами і процесами;
3) фізичні величини, які його характеризують;
4) можливості практичного застосування, способи запобігання шкідливим наслідкам

Про прилад або пристрій

1) призначення;
2) будова;
3) принцип дії;
4) сфера застосування;
5) правила користування

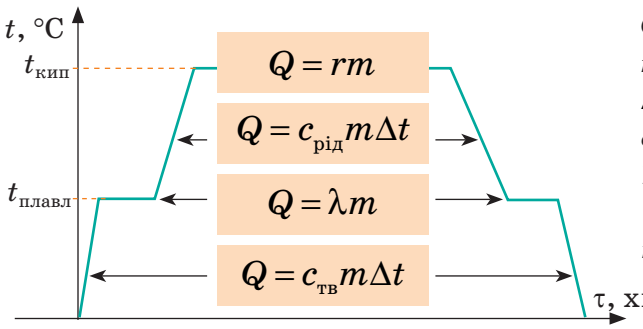
Про фізичний закон

1) формулювання; зв'язок між якими явищами і процесами встановлює закон;
2) математичний вираз;
3) досліди, що привели до встановлення закону або підтверджують його справедливість;
4) межі застосування

Про фізичну величину

1) символ для позначення;
2) властивість, яку характеризує фізична величина;
3) означення (дефініція);
4) формула, покладена в основу означення; зв'язок з іншими фізичними величинами;
5) одиниці;
6) способи вимірювання

КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ



Q — кількість теплоти, Дж
m — маса, кг
Δt — зміна температури, °С
c — питома теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot °С}$
λ — питома теплота плавлення, $\frac{Дж}{кг}$
r — питома теплота пароутворення, $\frac{Дж}{кг}$

Питома теплота згоряння палива, Дж/кг

$$Q = qm$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{нагр} = \frac{Q_{кор}}{Q_{повна}} \cdot 100\ \%$$

$$\eta_{тепл.\ дв} = \frac{A_{кор}}{Q_{повна}} \cdot 100\ \%$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД

Електричний заряд

Електричний заряд, Кл — Кількість електронів

$$|q| = N|e|$$

Модуль заряду електрона, $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Закон Кулона

Сила Кулона, Н — Відстань між зарядами, м

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

Коефіцієнт пропорційності, $9 \cdot 10^9 \ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$

Закон збереження електричного заряду

Сума зарядів до взаємодії

$$q_{01} + q_{02} + \ldots + q_{0n} = q_1 + q_2 + \ldots + q_n$$

Сума зарядів після взаємодії

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Сила струму

Сила струму, А

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

Час, с

Напруга

Електрична напруга, В

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

Робота струму, Дж

Опір

Питомий опір, Ом · м — Довжина, м

Опір, Ом

$$R = \rho\frac{l}{S}$$

Площа поперечного перерізу, м²

Закон Ома

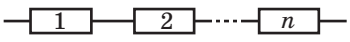
Сила струму, А — Напруга, В

$$I = \frac{U}{R}$$

Опір, Ом

Види з'єднання провідників

Послідовне

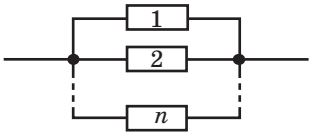


$$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$$

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

Паралельне



$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

Закон Фарадея

Електрохімічний еквівалент, $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$

$$m = kIt$$

Маса речовини, кг — Сила струму, А — Час електролізу, с

$$m = kq$$

Електричний заряд, Кл

Робота струму

Робота струму, Дж — Напруга, В

$$A = UIt$$

Сила струму, А — Час проходження струму, с

Потужність струму

Потужність струму, Вт — Сила струму, А

$$P = UI$$

Напруга, В

Закон Джоуля — Ленца

Кількість теплоти, Дж — Час, с

$$Q = I^2Rt$$

Сила струму, А — Опір, Ом

Підручник відрізняє наявність таких матеріалів:

- Тексти та ілюстрації для мотивації навчальної діяльності
- Алгоритми розв'язування основних типів фізичних задач
- Завдання для самоперевірки
- Домашні експериментальні завдання
- Покрокові описи лабораторних робіт
- Тематичне узагальнення і систематизація матеріалу
- Приклади практичного застосування фізики
- Відомості про досягнення фізики і техніки в Україні

Інтернет-підтримка дозволить:

- здійснити інтерактивне онлайн-тестування за кожною темою
- дізнатися про життя і діяльність видатних учених
- унаочнити фізичний дослід або процес

ВИДАВНИЦТВО
РАНОК

ISBN 978-617-09-6973-6

Інтернет-підтримка