

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНOK**

$$c_{\text{тіла}} = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_1)}{m_{\text{тіла}} (t_{\text{тіла}} - t)}$$

$$Q = cm\Delta t$$



Інтернет-  
підтримка

**Ф**

# ІЗИКА

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

**8**

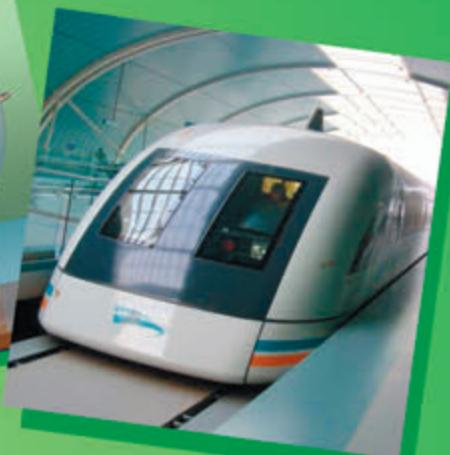
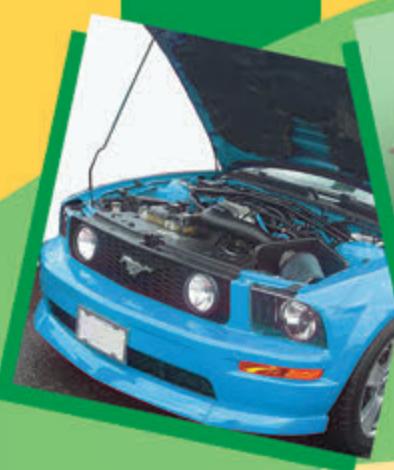
За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

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

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

**КЛАС**

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



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

$$I = \frac{U}{R}$$

УДК [37.016:53](075.3)

ББК 22.3я721

Ф 50

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

(наказ Міністерства освіти і науки України від 10.05.2016 р. № 491)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Підручник створено авторським колективом у складі:

В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, С. О. Довгий, О. О. Кірюхіна

Експерти, які здійснили експертизу даного підручника під час проведення конкурсного відбору проектів підручників для учнів 8 класу загальноосвітніх навчальних закладів і зробили висновок про доцільність надання підручнику грифа «Рекомендовано Міністерством освіти і науки України»:

*О. С. Лозинська*, вчитель фізики Верхньомайданської ЗОШ І–ІІ ступенів Надвірнянської районної ради Івано-Франківської області, вчитель-методист;

*А. І. Павленко*, професор Запорізького обласного інституту післядипломної педагогічної освіти, доктор педагогічних наук, професор;

*В. М. Ятвецький*, старший викладач кафедри природничо-математичних дисциплін та інформаційних технологій Одеського обласного інституту удосконалення вчителів, учитель-методист

**Рецензенти:**

*I. М. Гельфгат*, учитель фізики комунального закладу «Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учитель-методист, заслужений учител Украни, кандидат фізико-математичних наук;

*Г. П. Кобель*, доцент кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки, кандидат педагогічних наук

Автори й видавництво висловлюють щиру подяку:

*М. М. Кірюхіну*, президенту Спілки наукових і інженерних об'єднань України, кандидату фізико-математичних наук;

*I. Ю. Ненашеву*, учителю фізики комунального закладу «Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учителю-методисту, заслуженому вчителю України;

*I. В. Хован*, учителю фізики НВК «Домінант», кандидату педагогічних наук, за слушні зауваження й конструктивні поради;

*I. С. Чернецькому*, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук, за створення відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

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

**Ф 50    Фізика : підруч. для 8 кл. загальноосвіт. навч. закл. / [В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, С. О. Довгий, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Х. : Вид-во «Ранок», 2016. — 240 с. : іл., фот.**

ISBN 978-617-09-2855-9

УДК [37.016:53](075.3)

ББК 22.3я721

© Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я., Довгий С. О., Кірюхіна О. О., 2016

© Хорошенко В. Д., Зюзюкін В. В., ілюстрації, 2016

© Хлистун В. В., фотографії, 2016

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2016

ISBN 978-617-09-2855-9

## 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 дізнаєтесь 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.

Чимало цікавого на вас очікує на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання» ([interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)). Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп’ютерною перевіркою.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання* та *лабораторні роботи*. Обов’язково виконуйте їх — і ви будете краще розуміти й любити 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*» і «*Завдання для самоперевірки*», допоможуть систематизувати отримані знання, будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Працюючи над навчальними проектами, радимо уважно ознайомитися з деякими порадами щодо їх створення і презентації, поданими в матеріалі «*Етапи роботи над навчальними проектами*».

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 киплячої 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 дізнаєтесь 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

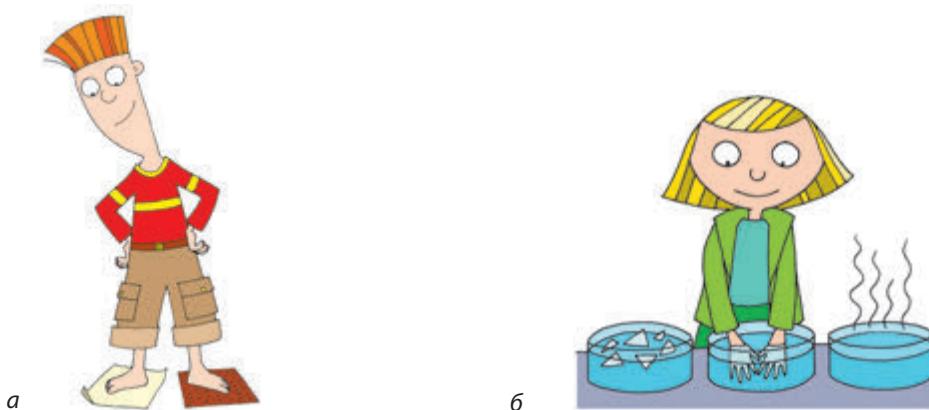
Усім змалку є звичними слова: гаряче, тепле, холодне. «Обережно, чашка гаряча, обпечешся», — застерігали нас дорослі. Ми не розуміли, що означає «гаряча», торкалися чашки — і обпікалися. «Сніг холодний, не знімай рукавичок, пальчики змерзнутъ», — умовляла бабуся. Нам дуже хотілося дізнатись, а як це — «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



**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 та оцінити, наскільки воно гаряче або холодне. Більш того, відчуття можуть нас обманювати. Справді, за тієї самої кімнатної температури металеві предмети здаються холоднішими від дерев'яних або пластмасових, а шорсткі — теплішими за 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, 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

Із курсу фізики 7 класу ви знаєте, що температура тіла тісно пов'язана зі швидкістю хаотичного руху його частинок (атомів, молекул, іонів). Цей рух так і називають — *тепловий*.

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



а



б



в

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

Швидкість руху окремих частинок (а отже, їхня кінетична енергія) постійно 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, 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?

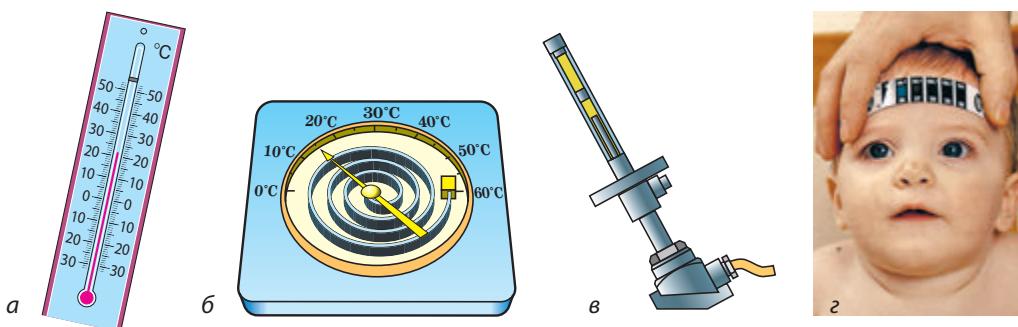
#### 4 Вимірюємо температуру

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 ґрунтуються на розширенні рідини під час нагрівання (докладніше про це ви дізнаєтесь із § 2). Найпростіший рідинний термометр складається з резервуара, наповненого рідиною (зазвичай спиртом або ртуттю), довгої тонкої трубки, в яку виступає стовпчик цієї рідини, і шкали (рис. 1.4). Довжина стовпчика рідини є мірою температури: чим вища температура тіла, тим вищим є стовпчик рідини в термометрі.

Щоб за довжиною стовпчика рідини можна було визначати температуру, слід нанести шкалу, насамперед позначивши на ній так звані *реперні точки*. Такі точки мають бути пов'язані з якими-сь фізичними процесами, які відбуваються за незмінної температурі та які легко відтворити.



**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 — термометр опору (зі зміною температури змінюється опір робочої частини термометра); г — рідинно-кристалічний (унаслідок зміни температури змінюється колір відповідної ділянки термометра)

Так, для побудови найбільш використовуваної шкали Цельсія за реперні точки беруть:

**0 °C — 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 °C (рис. 1.5, а);

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

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

1 °C дорівнює одній соті 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  $t$ :

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

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

$$t = T - 273.$$

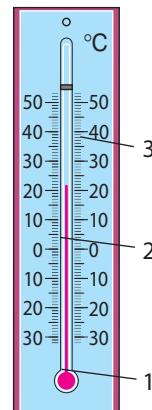
Зверніть увагу: термометр завжди показує свою власну температуру, отже, вимірюючи температуру будь-якого тіла, слід дочекатися стану теплової рівноваги між тілом і термометром.

Чому для вимірювання температури лікарі радять тримати термометр кілька хвилин?

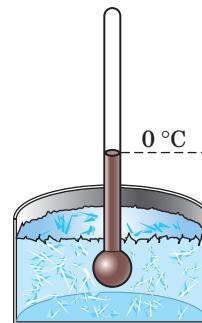
### Підбиваємо підсумки

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

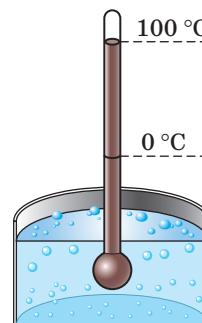
\* Під час перевірки одиниць у ході розв'язування задач цифру 1 зазвичай опускають.



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



а



б

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

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, із яких складається тіло. Прилади для вимірювання температури називають термометрами. Дія термометрів ґрунтуються на тому, що зі зміною температури змінюються певні властивості тіл.



### Контрольні запитання

- Чому не завжди можна оцінити температуру тіла на дотик?
- У чому полягає стан теплової рівноваги?
- Наведіть два означення температури.
- Чому хаотичний рух частинок тіла називають тепловим рухом?
- Наведіть приклади різних термометрів.
- Опишіть принцип дії рідинного термометра.
- Назвіть реперні точки шкали Цельсія.
- Температуру якого тіла завжди показує термометр?



### Вправа № 1

- Наведіть приклади тіл, що перебувають у стані теплової рівноваги. Об'ясніть свою відповідь.
- Згадайте будову й принцип дії рідинного термометра та поясніть, що більше розширяється під час нагрівання: скло чи рідина?
- Чому розміри термометра мають бути невеликими порівняно з розмірами тіла, температуру якого вимірюють?
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь про історію створення термометрів і різних температурних шкал (Фаренгейта, Реомюра тощо). Підготуйте коротке повідомлення.
- 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, тепlopровідності, 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 виллеться, адже, нагріваючись, вода розширюється. 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

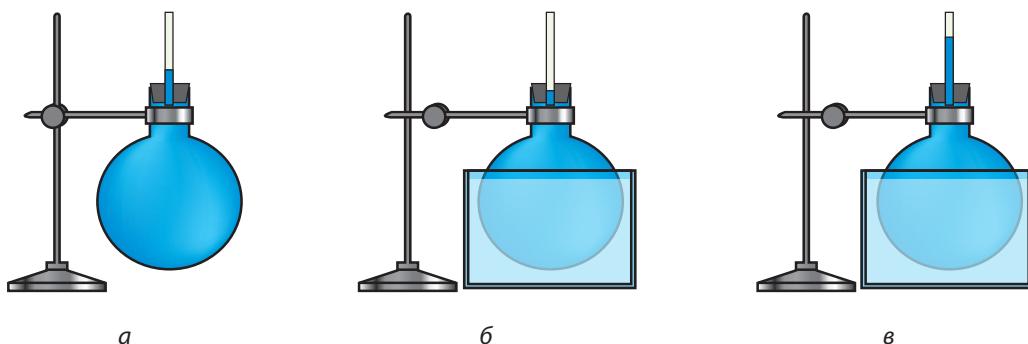
Нескладні досліди й численні спостереження перевірюють у тому, що, як правило, *тверді тіла, рідини й гази під час нагрівання розширюються, а під час охолодження — стискаються*.

*Теплове розширення газів* можна спостерігати за допомогою колби, заповненої повітрям. Шийку колби щільно закоркуємо, а в корок уставимо скляну трубку. Зануримо скляну трубку в посудину з водою. Тепер досить узятися за колбу рукою і в такий спосіб нагріти її; через деякий час повітря в колбі, розширюючись, 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



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

**?** Поясніть принципи роботи рідинного термометра.

*Теплове розширення твердих тіл* можна продемонструвати за допомогою пристрою, який винайшов нідерландський фізик *Вільгельм Якоб Гравезанд* (1688–1742). Пристрій являє собою мідну кульку, яка легко проходить крізь пригнане до неї кільце. Нагрімо 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*).

**?** Як, 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 (молекул, атомів, іонів) в тілі зі збільшенням температури не змінюється?

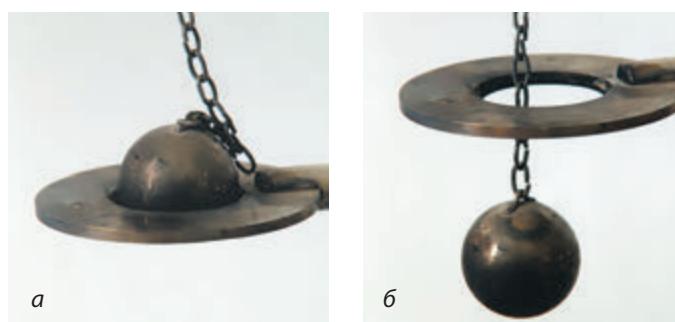
Теплове розширення тіл молекулярно-кінетична теорія пояснює так. Зі збільшенням температури збільшується швидкість руху частинок, з яких складається тіло. Середня відстань між частинками також збільшується, і, відповідно, збільшується об'єм тіла. І навпаки, зі зниженням температури тіла рух частинок стає повільнішим, міжмолекулярні проміжки зменшуються і, відповідно, зменшується об'єм тіла.

## 3 Характеризуємо теплове розширення тіл

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

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

**Рис. 2.3.** Пристрій Гравезанда, 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 алюмініеву трубку на скляну такої 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 °C (точніше до 3,98 °C) стискується, як і більшість речовин. Однак починаючи з температури 4 °C і до замерзання (0 °C) вода розширяється. Саме завдяки цій властивості річки, моря й океани не промерзають до дна навіть у сильні морози. Адже саме за температури 4 °C вода має найбільшу густину і тому опускається на дно водойми. За температури ж 0 °C 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.

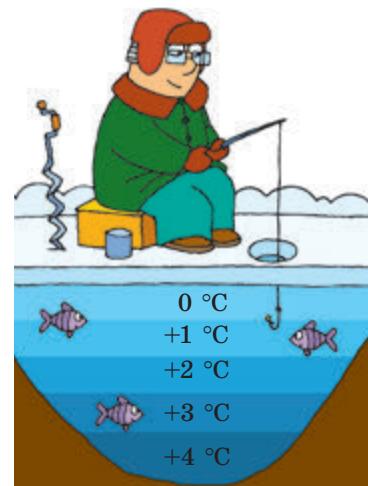
#### 4

### Знайомимося з тепловим розширенням у природі й техніці

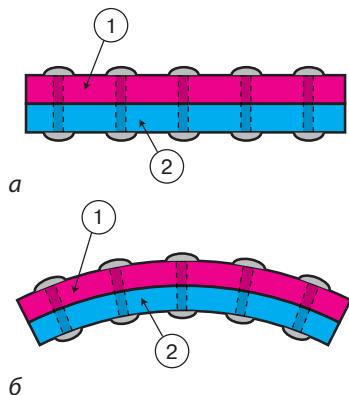
Здатність тіл змінювати свої розміри під час змінення температури відіграє дуже важливу роль у природі. Про особливості теплового розширення води ви вже дізналися. Розглянемо інші приклади.

Поверхня Землі прогрівається нерівномірно. У результаті повітря поблизу її поверхні розширяється теж нерівномірно. Цей факт — один із чинників утворення вітру, що, в свою чергу, зумовлює зміну погоди. Нерівномірне прогрівання води в морях і океанах спричиняє виникнення течій, які суттєво впливають на клімат. Різке коливання температури в гірських районах викликає розширення та стискання гірських порід. Це відбувається нерівномірно, тому виникають тріщини, що спричиняють руйнування гір, а отже, зміну рельєфу.

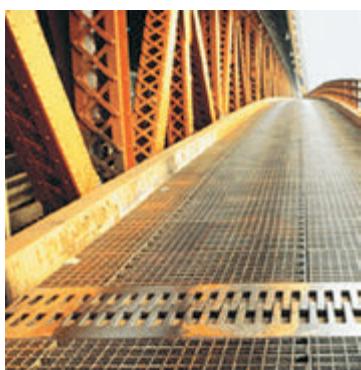
Явище теплового розширення широко використовується в техніці та побуті. Так, для автоматичного вимикання та вмикання електричних пристрій використовують біметалеві



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



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



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

пластинки. Дія таких пластинок заснована на тому, що різні метали по-різному розширяються під час нагрівання (рис. 2.5). Теплове розширення повітря допомагає рівномірно прогріти квартиру, остатити 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 електропередач, прокладання труб опалення, укладання залізничних рейок, виготовлення залізобетонних конструкцій і в багатьох інших випадках.

### Підбиваємо підсумки



Тверді тіла, рідини й гази під час нагрівання зазвичай розширяються. Особливості теплового розширення мають вода, чавун і деякі інші речовини. Тверді тіла та рідини розширяються 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, іонів) 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 розширяються під час нагрівання.
2. Описіть 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.



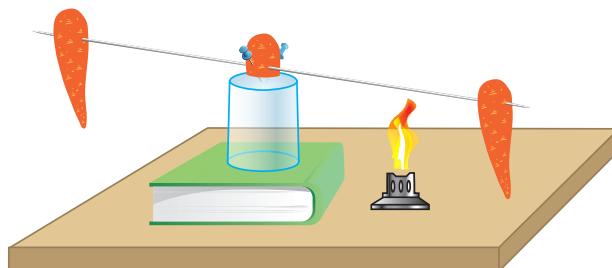
## Вправа № 2

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 застягає в кільці (див. [рис. 2.3](#)). Як змінилися 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. Що може трапитись, якщо налити в склянку окріп? Поясніть свою відповідь з точки зору теплового розширення тіл.
7. Металева кулька падає на підлогу з певної 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:

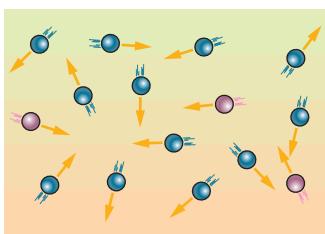
- 1) пропустіть крізь обрізок моркви сталеву в'язальну спицю;
  - 2) з обох боків спиці застроміть в обрізок моркви дві булавки, а на кожний кінець спиці насадіть невелику морквину так, щоб більша частина моркви була розташована знизу;
  - 3) установіть булавки гострими кінцями на дно склянки і, пересуваючи моркви, 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 5 копійок у 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, іонам) 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 великий 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 значення кінетичної енергії окремої частинки невелике, 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 — притягаються та відштовхуються.

Суму кінетичної енергії теплового руху частинок, із яких складається тіло, і потенціальної енергії їхньої взаємодії називають **внутрішньою енергією тіла**.

Одиницею внутрішньої енергії в СІ є **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, із яких складається тіло, є температура. Тому зміна температури означає й зміну сумарної кінетичної енергії всіх частинок, а отже, зміну внутрішньої енергії тіла.

Крім того, зі зміною температури тіло розширяється 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 дізнаєтесь наприкінці розділу I «Теплові явища».

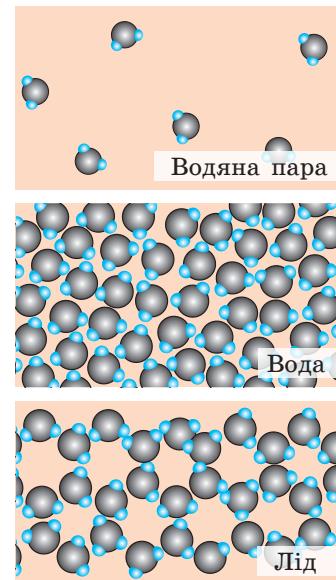
### 3

### 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 й механічна енергія — одне й те саме!» Проте це не так.

Дещо схожі за формальними ознаками, ці поняття значно відрізняються своєю сутністю — їх навіть вивчають у різних розділах фізики. Згодом ви дізнаєтесь 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 та взаємодію дуже великої кількості частинок ( $10^{23}$  або більше). 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. 3.3.** У різних агрегатних станах взаємне розташування молекул речовини є різним, тому відрізняється і потенціальна енергія взаємодії молекул



**Рис. 3.4.** За однакової температури внутрішня енергія льоду є меншою від внутрішньої енергії такої 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 одна відносно 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



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

### Вправа № 3



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

3. Як змінюються внутрішня й механічна енергії пляшки з водою у вашому наплічнику, коли ви в морозну погоду заходите з вулиці в теплий будинок? піднімаєтесь 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

A  $mgh$

2 Потенціальна енергія піднятого тіла

B  $Fs$

3 Повна механічна енергія

B  $E_k + E_p$

Г  $mv^2/2$



## § 4. СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

Згадайте, як ваші однокласники повертаються до школи після того, як на перерви грали в сніжки. Хтось енергійно тре руки, хтось тулиль 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 нагріється. У кожному з 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 віddaє під час теплопередачі.

Кількість теплоти позначають символом  $Q$ . Одиноцею кількості теплоти в СІ є **джауль (Дж)**\*:

$$[Q] = 1 \text{ Дж.}$$

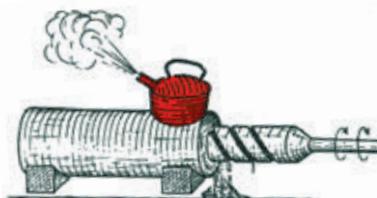
\* Для вимірювання кількості теплоти здавна застосовували таку одиницю, як *калорія* (від латин. *calor* — тепло). Зараз цю одиницю часто використовують для обчислення енергії, що виділяється в результаті засвоєння іжі: 1 кал = 4,2 Дж.



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



**Рис. 4.2.** Бенджамін Томпсон (граф Румфорд) (1753–1814), англійський фізик, наприкінці XVIII ст. вперше 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. Теплообмін триватиме, доки температури тіл не стануть однаковими, тобто доки між тілами не встановиться *теплова ріновага*.

## 2

### Змінюємо внутрішню енергію, виконуючи роботу

Численні спостереження й експерименти підтверджують: *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 саме виконує роботу? Приведемо 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 саме виконує роботу, то його внутрішня енергія зменшується.*



**Рис. 4.4.** Якщо інтенсивно потерти долоні одну об одну, вони розігриваються — 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 саме 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

- 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, коли воно виконує роботу і коли над ним виконують роботу? Вважайте, що теплообмін із навколошніми 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) тепlop передачею.
3. Чому військові, що десантуються з гелікоптерів по канатах, вдягають рукавички?
4. Чи істинним є твердження, що під час тепlop передачі енергія завжди переходить 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 тепlop передача. 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.

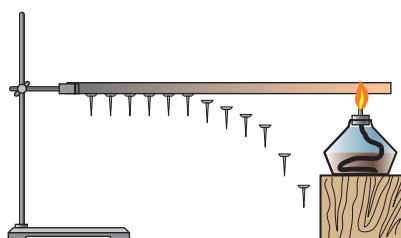
**§ 5. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ**

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.

**Знайомимося з механізмом тепlop провідності**

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).

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



**Рис. 5.1.** Дослід, який демонструє тепlop провідність металів

стрижня поміщають 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. Тепло від металу передається до воску, він розм'якається, 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 по-різному проводять тепло

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 нагріється набагато швидше. Це означає, що мідь краще проводить тепло, ніж сталь.

Досліди показали, що одними з найкращих провідників 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 досягне 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 розстане.

Ще гірше за рідину проводять тепло гази. І це легко пояснити. Відстань між молекулами газів набагато більша, ніж відстань між молекулами рідин і твердих тіл. Отже, зіткнення частинок і, відповідно, перенесення 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.

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. 5.2.** Досліди, що ілюструють низьку теплопровідність дерева (а) та води (б)



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



**Рис. 5.4.** Щоб запобігти нагріванню або охолодженню тіл, застосовують речовини з низькою тепlopровідністю

### 3

### Звертаємо увагу на тепlopровідність 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, наппаки, — довшає та густішає. Вовна, хутро, пух погано проводять тепло й надійно захищають тіло тварин від охолодження.

Тварини, що живуть або полюють у холодних морях, мають під шкірою товстий жировий прошарок, який завдяки слабкій тепlopровідності 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 жорстокі морози. Деякі рослини пустелі вкриті дрібними ворсинками: повітря між ними перешкоджає теплообміну з довкіллям.

Людина в різних сферах діяльності застосовує ті чи інші речовини, зважаючи на їхню тепlopровідність. Речовини з кращою тепlopровідністю 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

 Тепlopровідність — 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 тепlopровідників є метали, найгіршими — гази. Людина широко використовує 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.) і перший директор інституту — Валентин Миколайович Бакуль (1908–1978). У 1977–2014 рр. інститут очолював академік НАН України Микола Васильович Новиков; зараз він є почесним директором інституту.

В інституті розробляються технології отримання і використання надтвердих матеріалів. Під керівництвом М. В. Новикова створено нові напрями сучасного матеріалознавства: синтез великих надміцніх кристалів алмазу різного кольору, одержання алмазних і алмазоподібних плівок і покріттів з особливими властивостями, високотемпературна кераміка, комп’ютерне матеріалознавство. Розробки інституту застосовують у машинобудуванні, будівельній індустрії, видобутку та обробці природного каменю, геологорозвідувальному бурінні, електроніці, оптиці, медицині тощо.

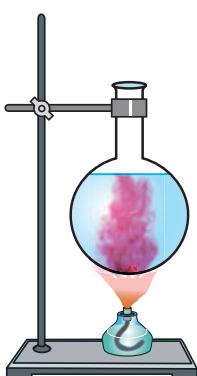
Від 1995 р. інститут є провідною організацією науково-технологічного алмазного концерну АЛКОН, продукція якого має попит як в Україні, так і в багатьох країнах світу.

Зараз інститут очолює член-кореспондент НАН України Володимир Зіновійович Туркевич.



## § 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 пеche 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.

Наповнимо круглодонну колбу на три четверті водою й закріпимо її в лапці штатива. Склянною паличкою покладемо на дно колби кілька дрібок акварельної фарби. Потім нагріватимемо колбу знизу. Через деякий час зі dna колби почнуть підніматися забарвлені струминки води. Досягши верхніх шарів води, вони спускатимуться вздовж більш холодних боків колби (рис. 6.1); далі процес повториться. У результаті відбудеться природне перемішування нагрітих і ненагрітих частин рідини.

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

У наведених прикладах спостерігаємо ще один вид тепlop передачі — **конвекцію**.

**Конвекція** — це вид тепlop передачі, який здійснюється шляхом перенесення теплоти потоками рідини або газу.

Зверніть увагу: **конвекція не може відбуватись у твердих тілах**, оскільки в них 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 виділімо невеличкий об'єм рідини на дні посудини, що 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 справджаються й для газів.

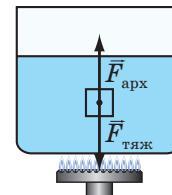
Часто природне перемішування шарів рідини або газу є неможливим або недостатнім. У такому разі вдаються до їхнього штучного перемішування — *примусової конвекції* (рис. 6.4). Примусове перемішування повітря здійснюють, наприклад, у космічному кораблі, в умовах невагомості, де не діє архімедова сила.

## 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 *бріз* — 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 розширяється, його густина зменшується, і повітря підіймається.



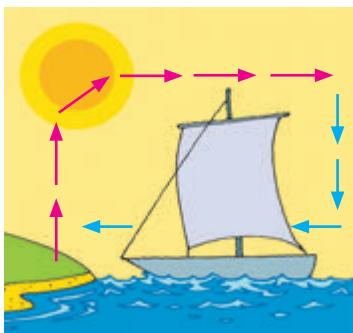
**Рис. 6.3.** На будь-який невеликий об'єм рідини, розташованій усередині рідини, діють сила тяжіння та архімедова сила



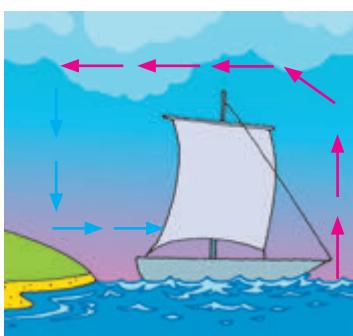
**Рис. 6.4.** Вода в посудині нагрівається завдяки природній конвекції. Для більш рівномірного прогрівання, наприклад, густої каши гості дінія вдається до примусової конвекції — перемішує кашу ложкою



**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 — пояснюються конвекцією: а — денний (морський) бриз; б — нічний (береговий) бриз

У результаті тиск над суходолом падає і холдне 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.

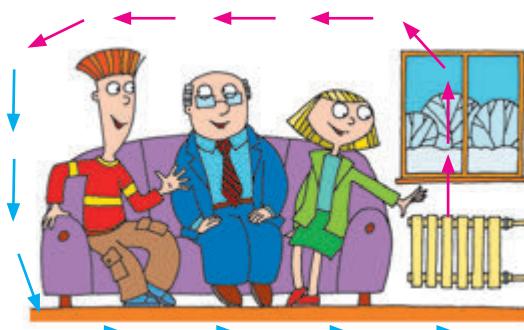
Через нерівномірне нагрівання води виникають постійні течії в морях і океанах. Океанські течії, як і вітри, відіграють значну роль у формуванні клімату на нашій планеті.

З конвекцією ми маємо справу не тільки в природі, але й у повсякденному житті. Так, унаслідок конвекції здійснюється обігрівання (рис. 6.7) та охолодження помешкань. Завдяки конвекції нагрівається борщ у каструлі. Створення тяги також є проявом конвекції (рис. 6.8). Повітря в печі нагрівається і розширяється, його густина зменшується, і тепле повітря прямує всередину дров і в трубі зменшується й стає меншим за тиск у кімнаті; завдяки цьому збагачене киснем холдне повітря струмуює до дров.

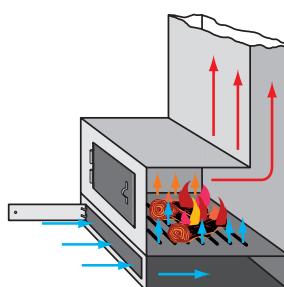
### Підбиваємо підсумки



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



**Рис. 6.7.** Невеликий тепловий радіатор за- вдяки конвекції обігріває все приміщення



**Рис. 6.8.** Створення тяги: збагачене киснем холдне 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

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



### Вправа № 6

- Чому язики полум'я підіймаються?
- Чому влітку вода в річці на глибині холодніша, ніж на поверхні?
- 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.
- Чому непадають хмари?
- Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, чому град зазвичай випадає влітку, спекотного дня.
- Як ви добре знаєте, спостереження, гіпотеза, експеримент належать до основних етапів пізнання у фізичних дослідженнях. Поспостерігайте за будь-яким простим процесом, наприклад за нагріванням води або таненням льоду. Запропонуйте гіпотезу щодо перебігу цього процесу. Проведіть відповідний експеримент. Підтверджив чи спростував експеримент вашу гіпотезу?



### Експериментальні завдання

- Запаліть свічку на підставці. Дослідіть напрямок конвекційних потоків уздовж відчинених дверей (див. рис. 1). Поясніть результати спостереження.
- Виріжте з тонкого паперу прямокутник, зігніть його по середніх лініях і знову розправте. Потім закріпіть на гумці швацьку голку вістрям дотори й покладіть на віст्रя підготований аркушік (див. рис. 2). Обережно наблизьте розкриту долоню до аркушка. Він почне обертатися. Відведіть долоню — аркушік зупиниться. Вам залишиться тільки показати фокус друзям і пояснити явище. (Підказка: температура долоні не скрізь однакова.)



Рис. 1



Рис. 2

## § 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, «вирощують» під сонячними променями глибокої давнини. Однак виникає запитання: як енергія від Сонця потрапляє на Землю, адже між цими космічними об'єктами практично немає молекул, тобто ані про тепlopровідність, 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



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

### 1

### Знайомимося з випромінюванням

Якщо стати 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 це тепло? Щоб одержати відповідь, згадаємо основні етапи пізнання у фізичних дослідженнях: спостереження, гіпотеза, експеримент.

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).

Висунемо *гіпотезу*: можливо, енергія передається завдяки тепlopровідності.

Щоб перевірити гіпотезу, проведемо *експеримент*: помістимо біля вогню лист металу (рис. 7.3, а). Він надійно захищить від жару незважаючи на те, що метал добре проводить тепло. А от прозоре скло, хоча воно і є гарним



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

теплоізолятором, захищає від жару менше, ніж непрозорий метал (рис. 7.3, б). 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

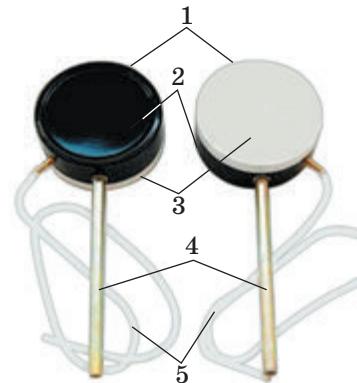
Електромагнітні хвилі поширюються навіть у вакуумі, тому випромінювання відрізняється від інших видів теплопередачі тим, що енергія може передаватися через простір, у якому відсутня речовина. Наприклад, енергія від Сонця до Землі й інших планет передається тільки завдяки випромінюванню. Однак неправильно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



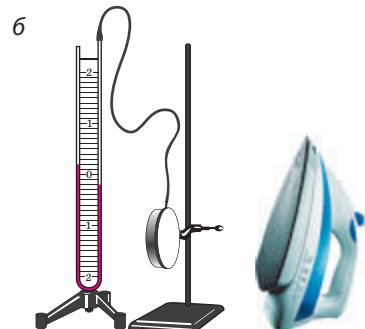
Згадайте, в якому одязі — світлому чи темному — ви краще почуваетесь у літньо спеку. Яку поверхню — світлу чи темну — сильніше нагрівають сонячні промені? Запропонуйте гіпотезу щодо того, як залежить здатність тіла поглинати теплове випромінювання від кольору цього тіла.

Щоб перевірити істинність вашої гіпотези, 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 розширилось.

Повернемо теплоприймач до праски полірованою поверхнею — у цьому випадку різниця



**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 залежність здатності тіла до поглинання тепла від кольору поверхні тіла

рівнів рідини в колінах манометра буде набагато меншою ([рис. 7.5, б](#)), тобто повітря в теплоприймачі нагріється менше.

*Тіла з темною поверхнею краще поглинають тепло 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 здійснюється 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

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



### Вправа № 7

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



### 7. Заповніть таблицю\*.

Фізична величина	Символ для позначення	Одиниця в СІ
	$m$	
		°C
		кг/м <sup>3</sup>
Кількість теплоти		

## § 8. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ РЕЧОВИНІ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ, ЩО ПОГЛИНАЄТЬСЯ РЕЧОВИНОЮ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ АБО ВІДІЛЯЄТЬСЯ ПІД ЧАС ОХОЛОДЖЕННЯ

На запитання: «Що швидше нагріється — 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 °C, рідина якої маси нагріється швидше?

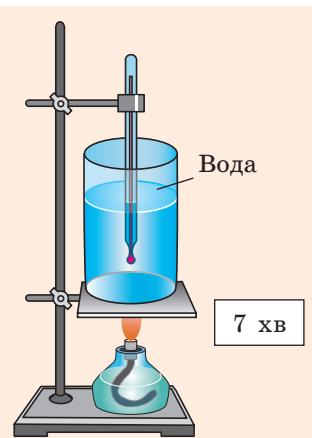
Поміркуємо над цим запитанням. По-перше, є очевидним: якщо рідина та сама, наприклад вода, то для нагрівання 300 г рідини потрібно більше часу, а отже, і більша кількість теплоти, ніж для нагрівання 200 г. Це означає, що *кількість теплоти, необхідна для нагрівання речовини, залежить від маси цієї речовини.*

Проте ми не знаємо, про які рідини йдеться в запитанні, і тому не можемо однозначно відповісти, яка з них нагріється 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.

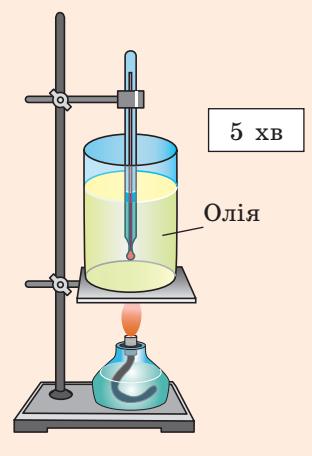
Візьмемо 200 г води і 200 г олії та нагріємо обидві рідини від 20 до 100 °C. Вимірювши час нагрівання, помітимо, що олія нагріється швидше, а отже, одержить меншу кількість теплоти, ніж вода ([рис. 8.1](#)).

Поміркуйте, чи однакову кількість теплоти поглинє речовина певної маси під час її нагрівання від 20 до 100 °C і під час її нагрівання від 20 до 40 °C. 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.*



$$\begin{aligned}m_{\text{води}} &= m_{\text{олії}} \\ \Delta t_{\text{води}} &= \Delta t_{\text{олії}}\end{aligned}$$



**Рис. 8.1.** Досліди 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 дозвели, 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;  $\Delta t$  — зміна температури;  $c$  — коефіцієнт пропорційності, що є характеристикою речовини і називається *пітома теплоємність речовини*.

## 2 Даємо означення пітомої теплоємності речовини

**Пітому 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 °C.

Пітому теплоємність позначають символом  $c$  і визначають за формулою:

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

З формули для визначення пітомуї теплоємності дістанемо її одиницю — **джоуль на кілограм-градус Цельсія**\*:

$$[c] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^{\circ}\text{C}}.$$

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

\* У СІ пітому теплоємність вимірюють *у джоулях на кілограм-kelвін*; числові значення пітомуї теплоємності, поданої в  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^{\circ}\text{C}}$  і  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , є однаковими.

**3**

### Порівнюємо питомі теплоємності різних речовин

Питомі теплоємності різних речовин можуть суттєво різнятися.

Так, питома теплоємність золота становить  $130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ , що означає: під

час нагрівання 1 кг золота на  $1^\circ\text{C}$  воно поглинає 130 Дж теплоти, а якщо 1 кг золота охолоне на  $1^\circ\text{C}$ , 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 на-

грівання 1 кг олії на  $1^\circ\text{C}$  вона поглинає 1700 Дж теплоти, а в процесі охолодження 1 кг олії на  $1^\circ\text{C}$  виділяється 1700 Дж теплоти.

*Питома теплоємність речовини в різних агрегатних станах є різ-*

*ною.* Наприклад, питома теплоємність води становить  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ , льо-

ду —  $2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ; 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  $10^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ . Визначте питому теплоємність цегли.

**Аналіз фізичної проблеми.** Питому теплоємність цегли можна знайти з формули, що визначає питому теплоємність речовини.

**Дано:**

$$m = 2000 \text{ кг}$$

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

$$t_2 = 60^\circ\text{C}$$

$$Q = 88 \text{ МДж} = \\ = 88\,000\,000 \text{ Дж}$$

**Знайти:**

$$c = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

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

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

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

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

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

**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 °C.

Питому теплоємність речовини позначають символом  $c$  і вимірюють у джоулях на кілограм-градус Цельсія  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ . Питому теплоємність можна обчислити 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  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . 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 °C). Яка кількість теплоти пішла на нагрівання ложки, якщо її температура збільшилася від 20 до 80 °C?
4. Для нагрівання на 160 °C деталі масою 250 г було передано 20 кДж теплоти. З якого матеріалу виготовлена 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 °C 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 °C?
8. Оберіть на карті дві місцевості, розташовані на одній широті: одна має бути біля моря, а друга — в глибині континенту. Скориставшись додатковими джерелами інформації, зіставте перепади температур (день — ніч, зима — літо) у цих місцевостях. Поясніть отриманий результат.

## § 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 з цим рівнянням і навчимося застосовувати його для розв'язання задач.

### 1 Записуємо 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**:

$$Q_1^- + Q_2^- + \dots + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + \dots + Q_n^+.$$

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: якщо процес теплообміну триватиме достатньо довго, то зрештою встановиться стан теплової рівноваги, тобто *температура всіх тіл системи стане однаковою*.

**Задача.** У воду масою 400 г, узяту за температури  $20^{\circ}\text{C}$ , додали 100 г гарячої води, що має температуру  $70^{\circ}\text{C}$ . Якою буде температура води? Важайте, що теплообмін із довкіллям не відбувається.

**Аналіз фізичної проблеми.** У теплообміні беруть участь два тіла. Віддає енергію гаряча вода: її температура зменшується від  $70^{\circ}\text{C}$  до кінцевої температури  $t$ . Одержану енергію холода вода: її температура збільшується від  $20^{\circ}\text{C}$  до  $t$ . За умовою, теплообмін із довкіллям не відбувається, тому для розв'язання задачі можна скористатися рівнянням теплового балансу.

**Дано:**

$$\begin{aligned}m_1 &= 400 \text{ г} = 0,4 \text{ кг} \\t_1 &= 20^{\circ}\text{C} \\m_2 &= 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг} \\t_2 &= 70^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

**Знайти:**

$$t - ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Кількість теплоти, одержана холодною водою:

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

Кількість теплоти, віддана гарячою водою\*:

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

Відповідно до рівняння теплового балансу:

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

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 потрібні перетворення, отримаємо:

$$m_1t - m_1t_1 = m_2t_2 - m_2t.$$

Звідси:

$$m_1t + m_2t = m_2t_2 + m_1t_1 \Rightarrow t(m_1 + m_2) = m_2t_2 + m_1t_1.$$

$$\text{Остаточно отримуємо: } t = \frac{m_2t_2 + m_1t_1}{m_1 + m_2}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

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

**Аналіз результату.** Одержане значення кінцевої температури води ( $30^{\circ}\text{C}$ ) є цілком реальним: воно більше за  $20^{\circ}\text{C}$  і менше від  $70^{\circ}\text{C}$ .

**Відповідь:**  $t = 30^{\circ}\text{C}$ .

\* Нагадуємо: рівняння теплового балансу ми будемо використовувати у вигляді, де значення кількостей теплоти взято за модулем, тобто є додатними. Тому тут і надалі в разі розрахунку кількості теплоти, яку віддає 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:

$$Q_1^- + Q_2^- + \dots + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + \dots + Q_n^+.$$



### Контрольні запитання

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



### Вправа № 9

У ході розв'язування задач теплообміном із довкіллям знектуйте.

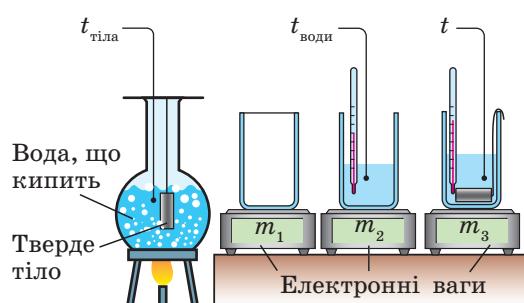
- У ванну налито 80 л води за температури  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Скільки літрів води за температури  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  потрібно додати у ванну, щоб температура води в ній становила  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Масою ванни знектуйте.
- У кастрюлю налили 2 кг води за температури  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а потім додали 4 кг води за температури  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Визначте температуру суміші. Масою каструлі знектуйте.
- Нагрітий у печі сталевий брусок масою 200 г занурили у воду масою 250 г за температури  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура води підвищилася до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Обчисліть температуру в печі.
- Латунна посудина масою 200 г містить 400 г води за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У воду опустили 800 г срібла за температури  $69\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У результаті вода нагрілася до температури  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Визначте питому теплоємність срібла.
- Наведіть приклади речовин, які за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  перебувають у твердому стані; рідкому стані; газоподібному стані.



### Експериментальне завдання

Скориставшись рисунком, складіть план проведення експерименту щодо визначення питомої теплоємності речовини.

Якщо ви маєте необхідне обладнання, проведіть відповідний експеримент.





## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

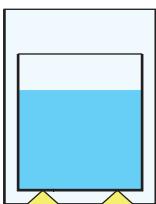


**Тема.** Вивчення теплового балансу за умови змішування води різної температури.

**Мета:** ознайомитися з будовою та принципом дії калориметра; визначити кількість теплоти, віддану гарячою водою, і кількість теплоти, одержану холодною водою, в 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](#)). Унаслідок слабкої тепlopровідності повітря й завдяки невеликій відстані між внутрішньою і зовнішньою посудинами, що зумовлює відсутність конвекційних потоків, у калориметрі теплообмін із довкіллям значно зменшується.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

#### II

#### Підготовка до експерименту

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

#### Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (*див. форзац*).

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

- Ознайомтесь із будовою калориметра.
- Налийте в мірний циліндр 60–80 мл холодної води. Визначте її об'єм ( $V_1$ ) і виміряйте її температуру ( $t_1$ ).
- Налийте в калориметр гарячої води (1/3 внутрішньої посудини калориметра) і виміряйте її температуру ( $t_2$ ).
- Не виймаючи термометра, вилийте в калориметр холодну воду з мірного циліндра і, обережно перемішуючи суміш мішалкою, стежте за показами термометра. Щойно змінення температури стане непомітним, запишіть температуру суміші ( $t$ ).
- Обережно вийміть термометр із води, протріть серветкою та скларайте 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:  $m_1 = \rho_{\text{води}} V_1$ . За формулою  $Q_1 = c_{\text{води}} m_1 (t - t_1)$  обчисліть кількість теплоти  $Q_1$ , одержану холодною водою.
2. Визначте об'єм  $V_2$  і масу  $m_2$  гарячої води:  $V_2 = V - V_1$ ;  $m_2 = \rho_{\text{води}} V_2$ . За формулою  $Q_2 = c_{\text{води}} m_2 (t_2 - t)$  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:

- порівняйте кількість теплоти, віддану гарячою водою, і кількість теплоти, одержану холодною водою;
- 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, електричний чайник із 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 віddaє енергію, одержують енергію вода, калориметр і термометр. Оскільки термометр і калориметр порівняно з водою одержують незначну кількість теплоти, можемо вважати, що кількість теплоти, віddaна твердим тілом, дорівнює кількості теплоти, одержаної холodnoю водою:  $Q_{\text{тіла}} = Q_{\text{води}}$ . Отже,

$$c_{\text{тіла}} m_{\text{води}} (t_{\text{тіла}} - t) = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_{\text{води}}); \text{ звідси:}$$

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

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

### II Підготовка до експерименту

- Перед тим як розпочати вимірювання:
  - уважно прочитайте теоретичні відомості, подані вище;
  - згадайте, що характеризує питома теплоємність речовини; одиницею питомої теплоємності речовин.
- Визначте ціну поділки шкал вимірювальних приладів.

### І Експеримент

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).*

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

- Налийте в мірний циліндр 100–150 мл води. Виміряйте об'єм води ( $V_{\text{води}}$ ).
- Перелийте воду з мірного циліндра в калориметр. Виміряйте початкову температуру води в калориметрі ( $t_{\text{води}}$ ).
- 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.
- 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 ( $t$ ).
- Вийміть термометр із води, осушіть його паперовою серветкою та покладіть у футляр.
- Вийміть металеве тіло із води, осушіть його паперовою серветкою та зважте ( $m_{\text{тіла}}$ ).

### ► Опрацювання результатів експерименту

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

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

### ► Аналіз результатів експерименту

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

- яку величину ви визначали;
- який результат отримали;
- які чинники вплинули на точність отриманого результату.

### Творче завдання

Запропонуйте спосіб визначення питомої теплоємності рідини. Запишіть план експерименту.

### \* Завдання «із зірочкою»

Оцініть відносну похибку експерименту, скориставшись формуловою:

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

де  $c_{\text{вим}}$  — отримане під час експерименту 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. НАНОМАТЕРІАЛИ



Чи доводилося 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

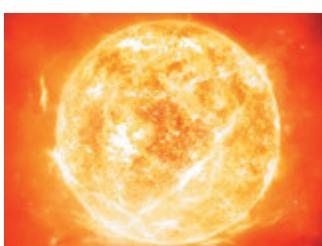
#### Спостерігаємо різні агрегатні стани речовини

Ви вже знаєте, що лід (сніг, іній) і вода — це різні агрегатні стани води: *твёрдий* і *рідкий*. Поява інею на деревах пояснюється просто: у повітрі завжди є водяна пара, яка, охолоджуючись, конденсується й осідає у вигляді інею. Водяна пара — це третій стан води — *газоподібний* (іноді використовують термін «газуватий»).

Наведемо ще приклад. Ви знаєте, що небезпечно розбити медичний термометр із ртуттю — густою рідиною сріблястого кольору; ртуть, випаровуючись, утворює дуже отруйну пару. А от за температури, нижчої від  $-39^{\circ}\text{C}$ , 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 з величезної кількості заряджених частинок (іонів і електронів) та нейтральних атомів і молекул. Наприклад, ртуть у плазмовому стані міститься 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 міжзоряній 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-різнові 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, іони) 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 гратки. Такі речовини називають **кристалічними**. Прикладами кристалічних речовин можуть бути алмаз, графіт (рис. 10.3), лід, сіль (рис. 10.4), метали тощо.

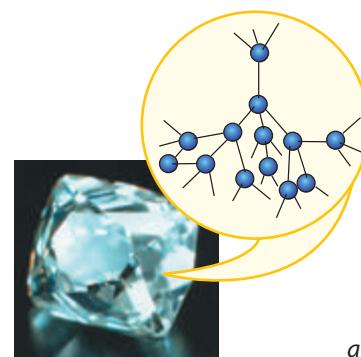
Порядок розташування частинок у кристалічній гратці речовини визначає фізичні властивості речовини. Так, алмаз і графіт складаються з тих самих атомів Карбону, однак ці речовини дуже різняться, оскільки в них по-різному розташовані атоми (див. рис. 10.3).

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

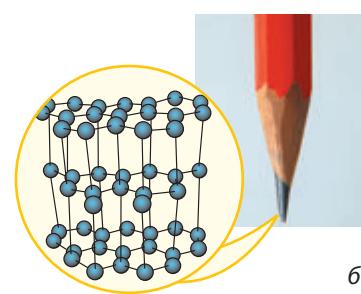
За певних умов тверді тіла плавляться, тобто переходят у рідкий стан. **Кожна кристалічна речовина плавиться за певної температурою.** На відміну від кристалічних, аморфні речовини не мають певної температури плавлення — вони переходят у рідкий стан, поступово розм'якшуючись. Докладніше про плавлення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



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

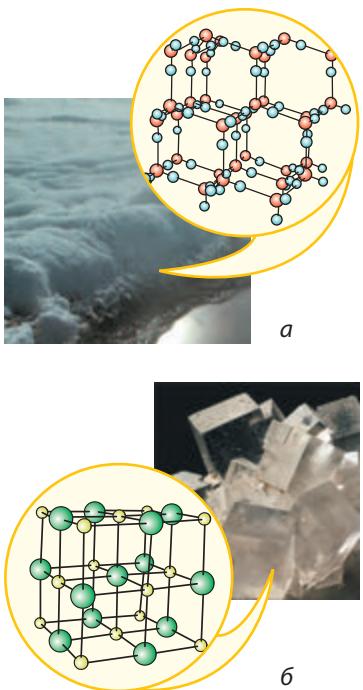


a



б

**Рис. 10.3.** Моделі кристалічних граток: а — алмазу, б — графіту. Кульками зображені атоми Карбону. Насправді атоми торкаються один одного; ліній, що з'єднують атоми, не існує, їх проведено лише для того, щоб продемонструвати характер просторового розташування атомів



**Рис. 10.4.** Моделі кристалічних граток: а — льоду ( $\text{H}_2\text{O}$  — молекула води: червоні кульки — атоми Оксигену, сині — атоми Гідрогену); б — кухонної солі (жовті кульки — іони Натрію, зелені — іони Хлору)



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

### 3 Пояснююмо 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 у твердих тілах, частинки в рідинах розташовані щільно (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 виривається 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 переважно в напрямку зовнішньої сили, тому рідина є **плинною** — під дією зовнішніх сил вона набуває форми тієї посудини, в якій міститься.

### 4 Пояснююмо фізичні властивості газів

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

Частинки газу розташовані на відстанях, які в десятки та сотні 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.

\* Нестисливість 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 повітря в класній кімнаті, зіштовхується з іншими та змінює швидкість свого руху приблизно п'ять мільярдів разів за секунду.

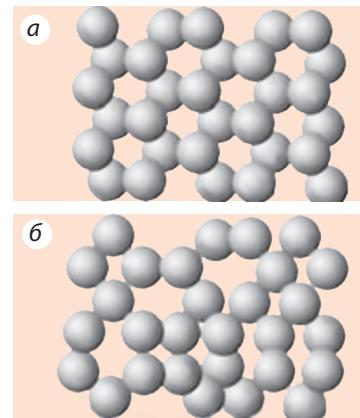
## 5 Дізнаємося про наноматеріали

«Поки що ми мусимо користуватися атомарними структурами, які пропонує нам природа... Ale 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).

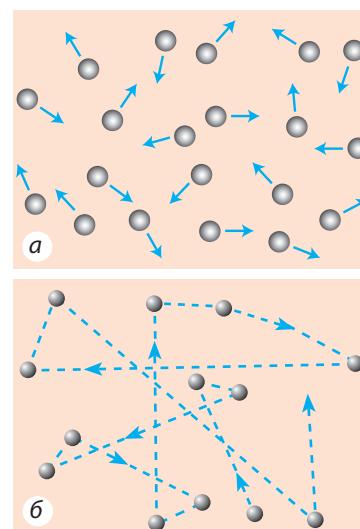
Фейнман припустив, що за допомогою певного «маніпулятора» можна брати окремі атоми та молекули і, складаючи їх як цеглинки, створювати нові матеріали. Науковець заклав майбутні основи та позначив основні напрями розвитку *нанотехнологій*. Це і надщільній запис інформації, і розробка мініатюрних комп’ютерів, 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. Ale вже в 1981 р. був створений сканувальний тунельний мікроскоп; з’явилася можливість маніпулювати речовиною на атомарному рівні та отримувати матеріали з унікальними властивостями — **наноматеріали**.

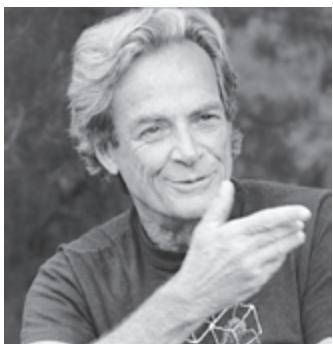
Згідно з тлумачним словником, матеріали — це предмети, речовини, сировина, що йдуть на виготовлення різноманітних виробів. Префікс *нано-* (у перекладі з грецької



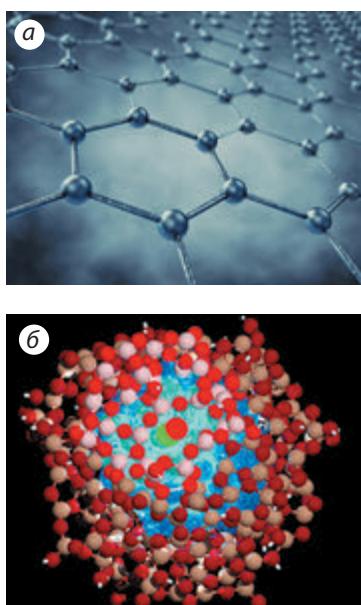
**Рис. 10.6.** Характер розташування частинок: а — у твердих кристалічних речовинах; б — у рідинах і аморфних речовинах (частинки в цілому розташовані хаотично, однак у невеликому об'ємі речовини зберігається певна взаємна орієнтація сусідніх частинок — існує більшій порядок)



**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 Карбону завтовшки лише 0,18 нм і горизонтальними розмірами близько 10 мкм; б — наночастинка — частинка, розмір якої в кожному напрямку не перевищує 100 нм

«гном, карлик») використовується для запису частинних одиниць СІ й означає «одна мільярдна». Відповідно об'єкти, один із лінійних розмірів яких розташований у межах від 1 до 100 нанометрів (1–100 нм), називають **нанооб'єктами** (рис. 10.9). Отже, **наноматеріали** — це предмети, речовини, сировина, які штучно створені з використанням нанооб'єктів і призначені для виготовлення різноманітних виробів.

## 6 Виявляємо властивості наноматеріалів та перспективи їхнього застосування

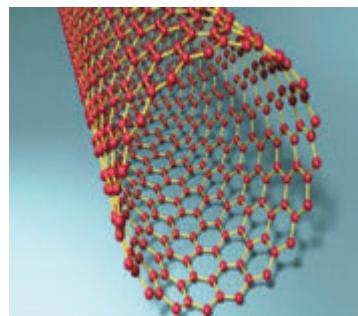
Властивості наноматеріалів дуже сильно відрізняються від властивостей звичайних речовин (навіть якщо й ті, й інші складаються з атомів одного виду), тому їх можна розглядати як особливий стан речовини.

На відміну від звичайних об'єктів, які складаються з величезної кількості частинок (атомів, молекул, іонів), нанооб'єкти можуть складатися лише з кількох десятків частинок. Саме тому вони мають *малі розміри*. Це дозволяє розмістити на невеликій площині 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 титан діоксиду 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.** Нанокапсули — мікро контейнери, які захищають ліки під час їх транспортування до хворої частини організму



**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, ХХІ 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, іонів) і характер їхнього руху.

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

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



### Контрольні запитання

- Чи можна стверджувати, що ртуть — завжди рідина, а повітря — завжди газ?
- Чи відрізняються одна від одної молекули водяної пари та льоду?
- У якому стані перебуває речовина в надрах зір?
- Чому тверді тіла зберігають об'єм і форму?
- У чому подібність і в чому відмінність кристалічних й аморфних речовин?
- Як рухаються і як розташовані молекули в рідинах?
- Чому гази займають весь наданий об'єм?
- Наведіть приклади нанооб'єктів.
- 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
  - в) збереже об'єм, але змінить форму
  - б) збереже і форму, і об'єм
  - 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?
- 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 свічку та, наприклад, 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 покращити властивості металів, зберігаючи їхні «добрі» якості та зменшуючи «погані».

Квантова фізика ХХ ст. надала можливість цілеспрямовано змінювати властивості металів. Процес базується на вивченні мікроструктури металів за допомогою різних методів.

Інститут металофізики, історія якого розпочинається в 1945 р., має для цього один із найбільших арсеналів сучасних приладів. Тому винайдення наприкінці ХХ ст. наноматеріалів учені інституту зустріли всебічно озброєними.

Наукові розробки інституту спрямовані на вивчення мікроструктури металів за різних температур, в умовах швидкого нагрівання та охолодження, радіаційного та ультразвукового випромінювання. Створено матеріали з унікальними властивостями, які використовують для авіаційної та автомобільної промисловостей, космічної техніки, виробів медичного призначення.

## § 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 шматочок сталі у свинцевій — 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, *розвідеться*.

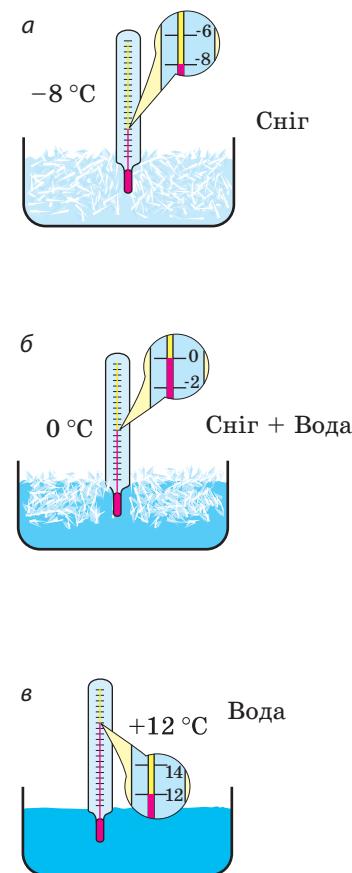
**Плавлення** — це процес переходу речовини з твердого стану в рідкий.

Простежимо зміну температури снігу в процесі його танення в теплій кімнаті (рис. 11.1). На початку досліду температура снігу є нижчою за  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сніг не тане, а його температура швидко збільшується (рис. 11.1, а). Щойно стовпчик термометра досягає позначки  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура перестає збільшуватись, а в склянці з'являється вода (сніг починає розвідатися). 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 розвідатися 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 розвідається, 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 в кімнаті:  
а — за від'ємної температури вода перебуває у твердому стані; б — за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  сніг починає танути, в процесі танення температура суміші незмінно дорівнює  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
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  $-115^{\circ}\text{C}$ , льоду —  $0^{\circ}\text{C}$ ; сталь плавиться за температури  $1400^{\circ}\text{C}$ , свинець — за температури  $327^{\circ}\text{C}$ , а щоб розплавити вольфрам, його слід нагріти до величезної температури  $3387^{\circ}\text{C}$ .



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

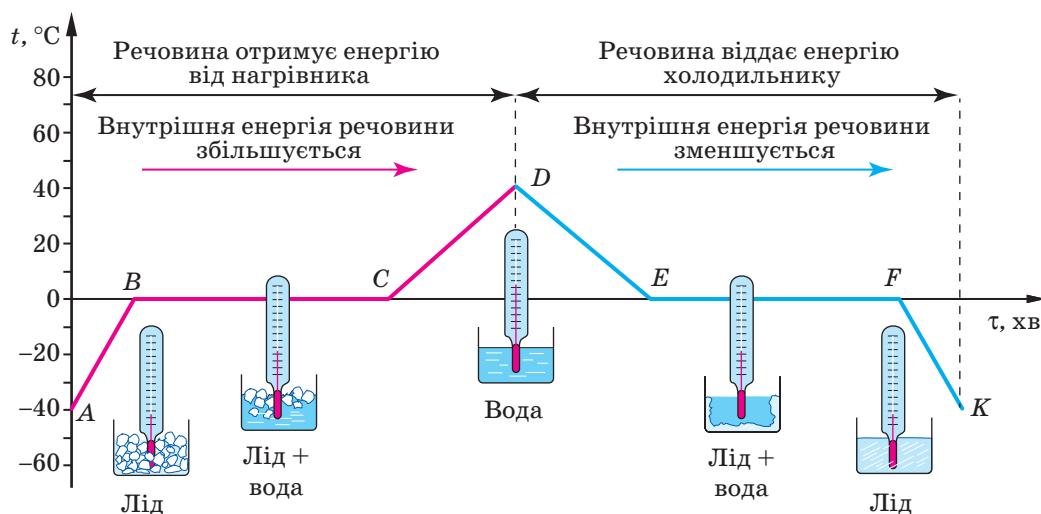
Температура плавлення (кристалізації) — це характеристика речовини, тому її визначають експериментально й заносять у таблиці (див. [табл. 2 Додатка](#)). У таких таблицях немає аморфних речовин, адже вони, як ви вже знаєте, не мають певної температури плавлення: нагріваючись, аморфні речовини поступово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

## 2

### Будуємо графік і пояснююмо 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  $-40^{\circ}\text{C}$ . 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 гратки льоду.



**Рис. 11.3.** Графік плавлення та кристалізації льоду. 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  $0$   $^{\circ}\text{C}$  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  $40$   $^{\circ}\text{C}$  (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 зменшується.

Коли досягнуто температури кристалізації  $0$   $^{\circ}\text{C}$  (точка  $E$ ), швидкість руху молекул зменшується настільки, що молекули вже не можуть перестрибувати з місця на місце. Вони поступово займають фіксовані положення (ділянка  $EF$ ), і до моменту завершення кристалізації всі молекули коливаються біля положень рівноваги. 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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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 більш теплое повітря в ній віddaє певну кількість теплоти більш холодному снігу. Збільшення температури снігу триватиме доти, доки його температура не стане  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . І отут починається найцікавіше. Температура снігу сягнула температури плавлення, а сніг не тане. Чому?

Згадайте: дослід, зображенний на рис. 11.1, проводився в теплій кімнаті (температура в якій була вищою за  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Отже, протягом усього часу спостереження віdbувався 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 віdbувається. Сніг не одержує енергію, отже, й не тане.

Якщо в холодильну камеру, температура в якій  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , помістити теплу воду, то зрозуміло, що вода буде охолоджуватися (тепла вода буде віddавати енергію повітрю в камері). Однак після досягнення температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вода не кристалізуватиметься, оскільки тепер, щоб перейти в стан із меншою внутрішньою енергією, їй потрібно віddати довкіллю певну кількість теплоти, а у випадку теплової рівноваги теплообмін не віdbувається.

**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.

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 віddавати 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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? А чи кристалізуватиметься за такої температури вода?
6. Опишіть процеси, що 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.

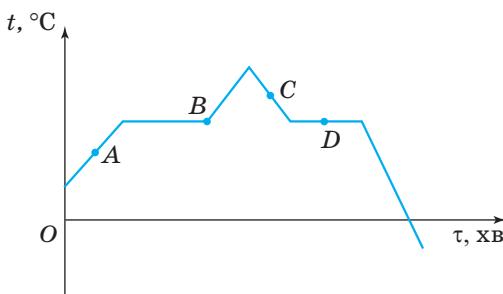


Рис. 1

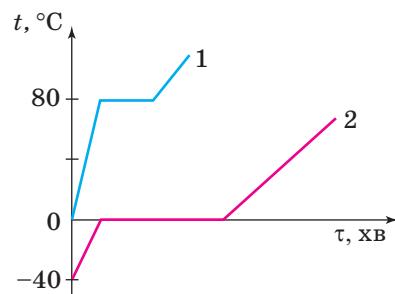


Рис. 2

4. У відрі з водою плавають шматки льоду. Чи танутиме лід, чи вода замерзатиме? Від чого це залежить?
5. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, коли і чому утворюються бурульки.
6. Які з наведених фізичних величин є характеристикою тіла?
  - маса;
  - жорсткість;
  - об'єм;
  - густина;
  - кінетична енергія;
  - питома теплоємність.



### Експериментальне завдання

«Морозна сіль». Змішайте 100 г снігу, узятого за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і 30 г кухонної солі (1 столова ложка з гіркою). Сніг почне швидко танути й охолоджуватися. Якщо в такий розчин опустити шматочок картоплини, то він 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 зображені 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**

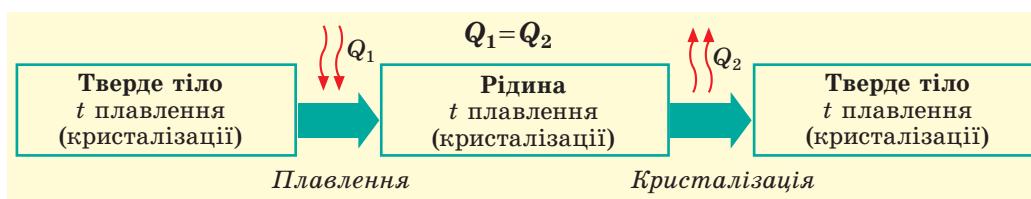
Ви знаєте, що під час переходу з твердого стану в рідкий речовина поглинає певну кількість теплоти і внутрішня енергія речовини збільшується, а перехід речовини з рідкого стану у твердий супроводжується виділенням теплоти та зменшенням внутрішньої енергії речовини.

Вивчення процесів плавлення та кристалізації показало, що кількість теплоти, яку необхідно витратити на плавлення певної маси речовини, дорівнює кількості теплоти, що 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 структур напевне потрібна різна кількість енергії. 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 *пітомую 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 таку саму кількість теплоти, яку виділяє під час кристалізації:  $Q_1 = Q_2$

Питому теплоту плавлення позначають символом  $\lambda$  («лямбда») і обчислюють за формуллою:

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

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 кілоджоулі на кілограм ( $\lambda = 332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ). Це означає: щоб розплавити 1 кг льоду, що перебуває за температурі плавлення ( $0^{\circ}\text{C}$ ), слід передати йому 332 кілоджоулі теплоти. Така сама кількість теплоти (332 кДж) виділиться й під час кристалізації 1 кг води. Тобто за температури  $0^{\circ}\text{C}$  внутрішня енергія 1 кг води більша за внутрішню енергію 1 кг льоду на 332 кДж.

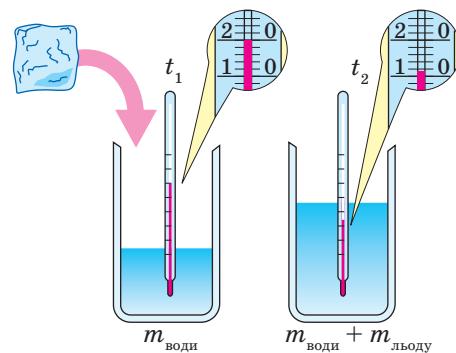
Що означає твердження: «Питома теплота плавлення сталі становить  $84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ »?

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 легкоплавких 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  $m_{\text{води}}$ , занурюють лід за температурі плавлення ( $t_{\text{пл}}=0^{\circ}\text{C}$ ). Вимірювши масу води після плавлення льоду ( $m_{\text{води}}+m_{\text{льоду}}$ ) і температуру води до і після плавлення льоду ( $t_1$  і  $t_2$ ), визначають питому теплоту плавлення льоду:

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



## 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:

$$Q = \lambda m,$$

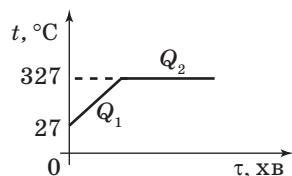
де  $Q$  — кількість теплоти, яку поглинає тверда кристалічна речовина;  $\lambda$  — питома теплота плавлення;  $m$  — маса речовини. (Дійсно, за означенням питомої теплоти плавлення:  $\lambda = \frac{Q}{m}$ , звідси  $Q = \lambda m$ .)

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

## 3 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Яка кількість теплоти потрібна, щоб розплавити 5 кг свинцю, взятого за температури 27 °C?

*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  $\lambda$  свинцю знайдемо відповідно в табл. 1 і 3 Додатка.

**Дано:**

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 27^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 327^\circ\text{C}$$

$$c = 140 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}}$$

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

$$= 25000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

**Знайти:**

$$Q = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (1)$$

$$Q_1 = cm(t_2 - t_1) \text{ — нагрівання;} \quad (2)$$

$$Q_2 = \lambda m \text{ — плавлення.} \quad (3)$$

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

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

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

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

$$Q = 140 \cdot 5 \cdot (327 - 27) + 25000 \cdot 5 = 335000 \text{ (Дж)}.$$

**Відповідь:**  $Q = 335 \text{ кДж.}$



### 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  $\lambda$ .

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, взятої за температури плавлення, дорівнює кількості теплоти, яка виділяється під час кристалізації цієї речовини. Цю кількість теплоти обчислюють за формулою  $Q = \lambda m$ .



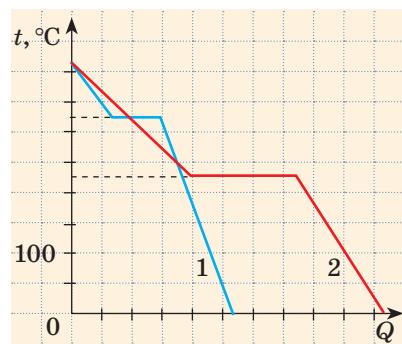
### Контрольні запитання

- Від чого залежить кількість теплоти, що виділяється під час кристалізації речовини?
- Що називають питомою теплотою плавлення речовини?
- Яким є фізичний зміст питомої теплоти плавлення?
- Як обчислити кількість теплоти, що необхідна для плавлення речовини або виділяється під час її кристалізації?



### Вправа № 12

- Яка кількість теплоти необхідна, щоб розплавити 500 г міді, взятої за температури плавлення?
- Яке тіло має більшу внутрішню енергію: алюмінієвий бруск маючи 1 кг, взятий за температури плавлення, чи 1 кг розплавленого алюмінію за тієї самої температури? На скільки більшу?
- Яка кількість теплоти виділиться під час кристалізації 100 кг сталі та подальшого її охолодження до 0 °C? Початкова температура сталі дорівнює 1400 °C.
- Яка кількість теплоти потрібна для перетворення 25 г льоду, взятоого за температури -15 °C, на воду за температури 10 °C?
- У гарячу воду поклали лід, маса якого дорівнює масі води. Після того як весь лід розтанув, температура води зменшилася до 0 °C. Якою була початкова температура води, якщо початкова температура льоду дорівнювала 0 °C?
- На рисунку зображені графіки залежності температури від кількості відданої теплоти в процесі кристалізації двох речовин однакової маси. Яка речовина має вищу температуру плавлення? більшу питому теплоємність у рідкому стані?



- 7.** Свинцева куля, яка рухалася зі швидкістю 300 м/с, ударилаась об металеву пластину і зупинилася. Яка частина свинцю розплакувилася, якщо вважати, що свинець повністю поглинув енергію, яка виділилася під час удару? Початкова температура кулі 27 °C.
- 8.** На дні посудини намерз лід. У посудину налили води. Чи зміниться рівень води в посудині після того, як увесь лід розстане? 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 становить 0 °C.



## § 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 остыдити руки, ми на них дмемо, а якщо хочемо зігріти, то дихаємо? Щодня можна поставити собі безліч таких запитань. У цьому параграфі ви знайдете відповіді на деякі з них.

### 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 знову затверднати чи перетворитися на газ.

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

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

Якщо розлити воду, то через якийсь час калюжа зникне; речі, що промокли під дощем, обов'язково з 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, напевне, відчували запах нафталіну, помічали, що під час сильних морозів кудись зникають замерзлі калюжі тощо). Цей процес називають *сублімацією*.

**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.

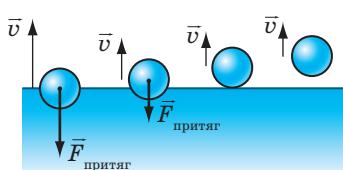
По-перше, той факт, що в рідині завжди є молекули, які рухаються досить швидко, дозволяє зробити висновок, що *випаровування рідин відбувається за будь-якої температури*.

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*.

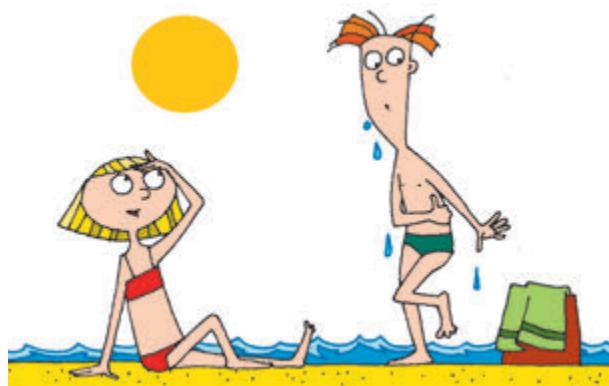
Крім того, під час випаровування виконується робота проти сил міжмолекулярного притягання та проти сил зовнішнього тиску, тому *процес випаровування супроводжується поглинанням енергії* (рис. 13.2).

**3****З'ясовуємо, від чого залежить швидкість випаровування**

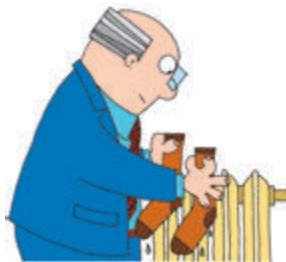
*Чим вища температура рідини, тим швидше рідина випаровується.* Адже зі збільшенням температури рідини збільшується кількість «швидких» молекул, тому дедалі більша їх кількість має змогу подолати сили міжмолекулярного притягання й вилетіти за межі рідини.



**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 площи вільної поверхні рідини (чай перелито з 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 його 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'ятій одяг висихає набагато повільніше. Чому? Тому що *швидкість випаровування залежить від площи вільної поверхні рідини*: чим більша площа поверхні рідини, тим більше на цій поверхні «швидких» молекул 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 обпеченою 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 «хмарка» 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<sup>2</sup> води щосекунди вилітає  $10^{21}$  молекул.



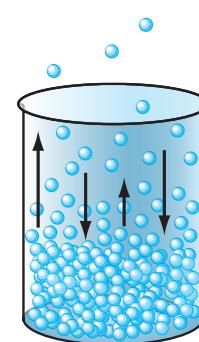
**Рис. 13.6.** Швидкість випаровування залежить від руху повітря

#### 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**.

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. 13.7.** Багато молекул, які залишили рідину, можуть повернутися в неї внаслідок теплового руху



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

Коли вологе повітря піднімається у вищі шари атмосфери, то, охолоджуючись, воно утворює *хмари* (рис. 13.8, *б*). Хмари складаються з дрібних краплинок води, що утворилися внаслідок конденсації водяної пари. Коли вологе повітря охолоджується поблизу поверхні Землі, утворюється *туман* (рис. 13.8, *в*). Оскільки процес конденсації супроводжується *виділенням енергії*, то утворення туману затримує зниження температури повітря.

### **Підбиваємо підсумки**

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають *пароутворенням*. Процес пароутворення з вільної поверхні рідини називають *випаруванням*.

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

Конденсацією називають процес переходу речовини з газоподібного стану в *рідкий*.

Випарування відбувається з поглинанням енергії. Конденсація, навпаки, супроводжується *виділенням енергії*.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке пароутворення? 2. Які способи пароутворення ви знаєте?
3. Що таке випарування? 4. Від яких чинників і чому залежить швидкість випарування? 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», що 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.
7. Понад 4500 років тому єгиптяни використовували глечики, в яких вода залишалася прохолодною навіть спекотного дня. У Середньовіччі охолоджувальні глечики (алькараца) були поширені

в народів Півдня. Наприкінці ХХ 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). Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся про охолоджувальні глечики більше. Підготуйте повідомлення.



### Експериментальне завдання

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

### Фізика і техніка в Україні



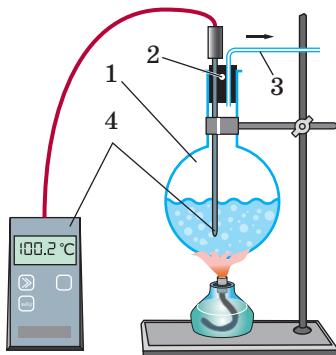
**Михайлі Петрович Авенаріус** (1835–1895) протягом 1865–1891 рр. працював у Київському університеті. Учений був організатором і керівником київської школи фізиків-експериментаторів — першої фізичної школи в Україні.

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. Авенаріус разом зі своїми учнями одержав кількісні характеристики цих процесів, які ввійшли до фізичних довідників того часу. М. П. Авенаріус першим указав на те, що в критичній точці питома теплота випаровування дорівнює нулю. Учений запропонував оригінальну систему розподілу змінних струмів, був ініціатором вивчення сонячної радіації та атмосферної електрики в країні.

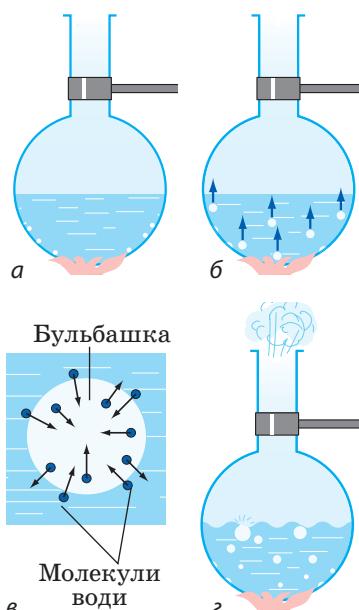
Удосконалена Авенаріусом система освітлення демонструвалася на Паризькій електротехнічній виставці у 1881 р., де отримала срібну медаль. За це Михайлі Петрович був відзначений найвищою нагородою Французької Республіки — орденом Почесного Легіону.

## § 14. КИПІННЯ. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРОУТВОРЕННЯ

До якої температури можна нагріти воду? Чи є сенс збільшувати потужність пальника, щоб прискорити готовання борщу? Як закип'ятити воду за допомогою снігу? На деякі запитання ви знайдете відповіді в цьому параграфі, на деякі зможете відповісти самі після його вивчення.



**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 і водяною парою\*. Річ у тім, що зі збільшенням температури розчинність газів зменшується, а «зайвий» газ виділяється всередину бульбашок. Зі зростанням температури тиск газу всередині бульбашок теж зростає, і щойно цей тиск перевищить зовнішній тиск, бульбашки починають збільшуватися в об'ємі.

Після досягнення кожною бульбашкою певного розміру *архімедова сила*, що діє на неї, 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 холоніші за нижні, тому у верхніх шарах водяна пара в бульбашках конденсується і бульбашки схlopуються. Цей процес супроводжується шумом і утворенням численних дрібних бульбашок. Вода стає каламутною — говорять, що вона «кипить білим ключем».

Коли вся рідина прогріється (температури верхніх і нижніх шарів зрівняються), бульбашки, піднімаючись, уже не зменшуватимуться в об'ємі, а навпаки, будуть збільшуватися, адже всередину бульбашок активно

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

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 °C.

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

**2**

### З'ясуємо, від чого залежить температура кипіння

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

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



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

З'ясуємо, від чого залежить температура кипіння рідини.

Для початку зменшимо вихід пари з колби, міцно затиснувши трубку, що 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).

Налімо в колбу теплу воду. За допомогою насоса відкачуватимемо 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

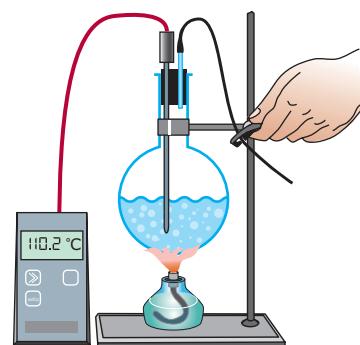
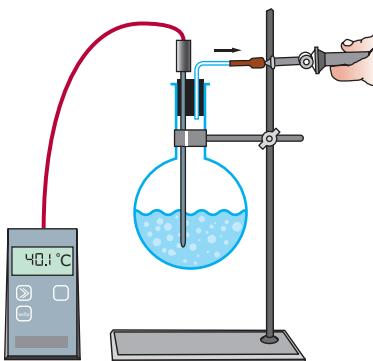


Рис. 14.4. У разі затиснення трубки для відведення пари тиск усередині колби збільшується, і це приводить до підвищення температури кипіння рідини



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



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

від 100 °C. З із 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 нормальногого 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 нормальногого 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.

З 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 витрачається на перетворення рідини на пару або виділяється в ході конденсації пари

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;  $m$  — маса рідини (маса утвореної пари);  $r$  — питома теплота пароутворення. (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 така сама кількість теплоти, яка йде на утворення пари.

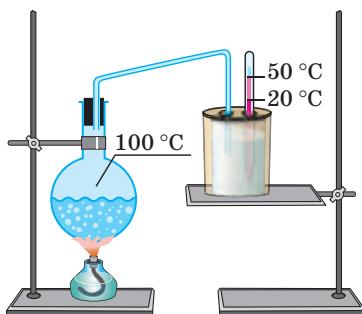
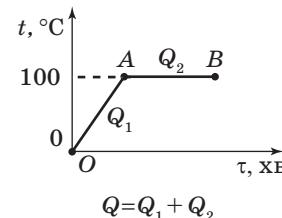
**5**

### Учимося розв'язувати задачі

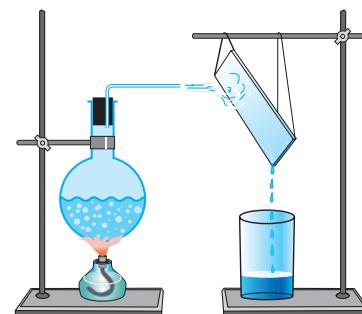
**Задача 1.** Яка кількість теплоти необхідна, щоб довести до кипіння й повністю випарувати 3 кг води, взятої за температури 0 °C?

**Аналіз фізичної проблеми.** Побудуємо схематичний графік залежності температури води від часу нагрівання (див. [рисунок](#)).

У перший момент температура води ( $t_0$ ) була 0 °C — 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 °C (температура кипіння води), вода починає кипіти, і її температура не



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



**Рис. 14.8.** Дослід, що демонструє конденсацію пари

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.

**Дано:**

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

**Знайти:**  
 $Q = ?$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

$$Q_1 = cm(t - t_0) \quad \text{— нагрівання води;} \quad (1)$$

$$Q_2 = rm \quad \text{— пароутворення;} \quad (2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \text{— загальна кількість теплоти.} \quad (3)$$

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

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

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

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

$$Q = 4200 \cdot 3 \cdot (100 - 0) + 2,3 \cdot 10^6 \cdot 3 = 8160000 \text{ (Дж)}.$$

*Відповідь:*  $Q = 8,16 \text{ МДж.}$

**Задача 2.** Під час досліду щодо визначення питомої теплоти пароутворення води водяна пара, що має температуру  $100^\circ\text{C}$ , надходить до калориметра, в якому міститься  $500 \text{ г}$  води за температури  $20^\circ\text{C}$  (див. рис. 14.7). Після закінчення досліду температура води в калориметрі становила  $50^\circ\text{C}$ , а її маса збільшилася на  $25 \text{ г}$ . За даними досліду обчисліть питому теплоту пароутворення води. Вважайте, що теплообмін з калориметром і довкіллям відсутній.

**Дано:**

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

**Знайти:**  
 $r = ?$

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

*Віддає енергію*

водяна пара

• спочатку конденсується:

$$Q_1 = rm_{\text{пари}};$$

• отримана вода охолоджується:  $Q_2 = c_{\text{води}} m_{\text{пари}} (t_1 - t)$ .

*Отримує енергію*

вода в калориметрі

• нагрівається:

$$Q_3 = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t - t_2).$$

За умовою задачі теплообмін з довкіллям відсутній, тому:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3,$$

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

Звідси знайдемо питому теплоту пароутворення води:

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

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

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

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

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

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

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



### Підбиваємо підсумки

Процес пароутворення, що відбувається в усьому об'ємі рідини й 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 пара, конденсуючись. Цю кількість теплоти обчислюють за формулою  $Q = rm$ .



### Контрольні запитання

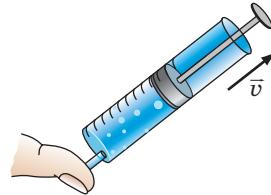
1. Що таке кипіння? 2. Які явища спостерігаються в рідині перед тим, як вона починає кипіти? 3. Яка сила змушує бульбашку газу підніматися на поверхню рідини? 4. Чи змінюється температура рідини під час кипіння? 5. Від яких чинників залежить температура кипіння рідини? 6. На що витрачається енергія,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

**Вправа № 14**

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

**Експериментальні завдання**

1. У прозору скляну пляшку обережно налийте невелику кількість гарячої води. Покачайте воду в пляшці, збільшуочи таким чином площину вільної поверхні води, а отже, швидкість випаровування. Но воутворена 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 й із зусиллями терти сірник другим кінцем, стільки тепла не виділиться. Відповіді на зазначені запитання ви знайдете в цьому параграфі.



## 1 Знайомимося з різними видами палива

Ми часто маємо потребу збільшити температуру якогось тіла. Так, щоб у кімнаті стало 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).

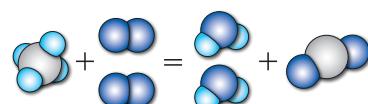
Паливом можуть слугувати як природні речовини (кам'яне вугілля, нафта, торф, дрова, природний газ) (рис. 15.2), так і спеціально одержані людиною (газ, бензин, порох, деревне вугілля, етиловий спирт тощо) (рис. 15.3). Як бачимо, паливо буває *твердим* (кам'яне вугілля, торф, дрова, сухе пальне), *рідким*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

Для сучасної цивілізації паливо — необхідна умова існування (рис. 15.4). Для роботи транспорту, різних механізмів у промисловості й сільському господарстві, обігрівання житла та готовання їжі людина перетворює енергію палива на інші форми.

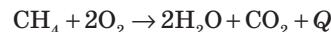
## 2 Уводимо поняття питомої теплоти згоряння палива

Паливо відрізняється одне від одного теплотворною здатністю. Переконаємося у цьому за допомогою простого досліду.

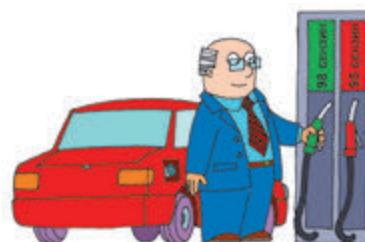
Поставимо на ліву шальку терезів спиртівку, наповнену спиртом. Над спиртівкою підвісимо металеву банку з водою, перед тим вимірювши температуру води. Після того як зрівноважимо терези, покладемо на ліву шальку важок масою 1 г. Рівновага терезів порушиться (рис. 15.5, а). Запалимо спиртівку. У міру згоряння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



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



**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).



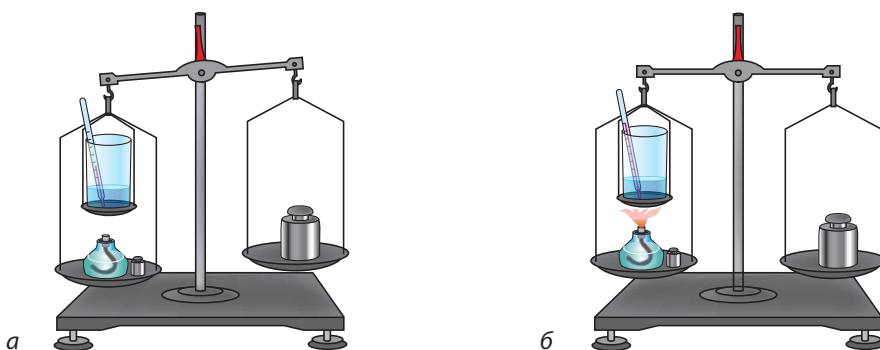
**Рис. 15.4.** Для сучасної цивілізації паливо є необхідною умовою існування

означати, що згорів 1 г спирту) (рис. 15.5, б). У цей момент погасимо спиртівку і знову вимірюємо 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 *пітома теплота згоряння палива*.

**Пітома 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

## § 15. Теплота згоряння палива. Коефіцієнт корисної дії нагрівника

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 формулі для означення питомої теплоти згоряння палива дістанемо одиницю цієї величини в СІ — **джауль 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?

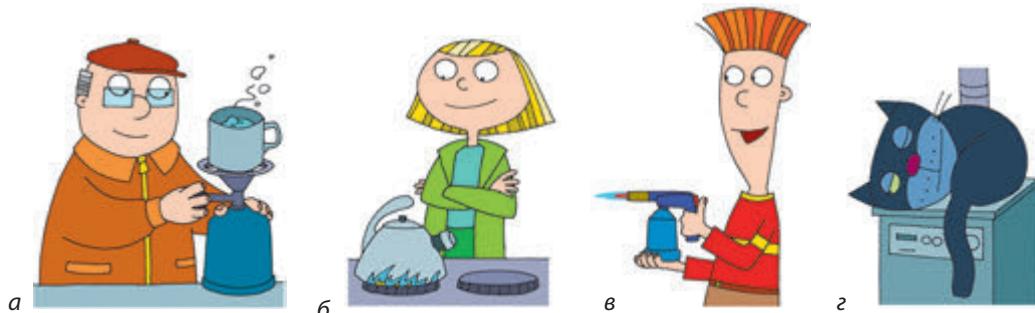
Знаючи питому теплоту згоряння  $q$  й масу  $m$  палива, обчислимо кількість теплоти  $Q$ , яка виділиться в ході повного згоряння цього палива: оскільки  $q = \frac{Q}{m}$ , то

$$Q = qm$$

### 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](#)).

Тип 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*,



**Рис. 15.6.** Різноманітні нагрівальні пристрої, які використовує людина: 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, виноситься 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  $\eta$  — коефіцієнт корисної дії нагрівника;  $Q_{\text{кор}}$  — корисно спожита теплота;  $Q_{\text{повна}}$  — теплота, яка може бути виділена в процесі повного згоряння 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 кількість сухих дров їм треба заготовити, щоб закип'ятити 10 кг води? Вода одержує 15 % енергії, що виділяється під час повного згоряння дров. Температура води в струмку 15 °C.

**Дано:**

$$m_{\text{води}} = 10 \text{ кг}$$

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

$$t_1 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$$c_{\text{води}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {^{\circ}\text{C}}}$$

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

**Знайти:**

$$m_{\text{дров}} = ?$$

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі, розв'язання*

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

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

Кількість теплоти, яку необхідно витратити на нагрівання води:

$$Q_{\text{кор}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_2 - t_1) . \quad (2)$$

Кількість теплоти, яка виділяється під час повного згоряння дров:

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

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

$$\eta = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_2 - t_1)}{q_{\text{дров}} m_{\text{дров}}} \Rightarrow \eta q_{\text{дров}} m_{\text{дров}} = c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_2 - t_1) \Rightarrow \\ \Rightarrow m_{\text{дров}} = \frac{c_{\text{води}} m_{\text{води}} (t_2 - t_1)}{\eta q_{\text{дров}}}.$$

За нормального атмосферного тиску вода кипить за температури 100 °C. Питому теплоємність води є питома теплота згоряння дров знайдемо відповідно в табл. 1 і 6 Додатка.

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$\left[ m_{\text{дров}} \right] = \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot ^\circ\text{C} \right) : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг}; \\ m_{\text{дров}} = \frac{4200 \cdot 10 \cdot (100 - 15)}{0,15 \cdot 1 \cdot 10^7} = \frac{4200 \cdot 10 \cdot 85}{15 \cdot 10^5} = 2,38 \text{ (кг)}.$$

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

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



### 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 її вимірюється в джоулях на кілограм ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ).

Згоряння палива відбувається в нагрівниках. ККД нагрівника позначають символом  $\eta$  і 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 така 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. Визначте температуру води в чайнику, якщо вода одержала 40 % тепла, яке може бути виділено під час повного згоряння цього газу.
- 6.** Спробуйте пояснити, чому під час спалювання сирих дров виділяється менша кількість теплоти, ніж під час спалювання такої самої маси сухих дров.
- 7.** Установіть відповідність між фізичною величиною та виразом для її визначення.
 

1 Механічна робота	A $\rho V$
2 Шлях	B $Fl$
3 Потужність	C $vt$
4 Потенціальна енергія піднятого тіла	D $\frac{A}{t}$ E $mgh$

**Експериментальне завдання**

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

**Фізика і техніка в Україні**

**Чернівецький національний університет ім. 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 функціонує 2 інститути і 11 факультетів, де навчається майже 20 тисяч студентів. Навчально-наукову роботу забезпечують понад 100 докторів наук, професорів, близько 700 кандидатів

наук, доцентів. Серед основних напрямів досліджень, пов'язаних із фізикою, можна назвати теоретичні та прикладні дослідження напівпровідникового матеріалознавства; розроблення нових технологій, матеріалів, мікросхем і приладів для опто-, радіо- та мікроелектроніки, напівпровідникового приладобудування; статичну оптику; голограмію та ін.



## § 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 і за яких умов є можливим таке перетворення?



### 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 починає підстрибувати. З'ясуємо, чому так відбувається.

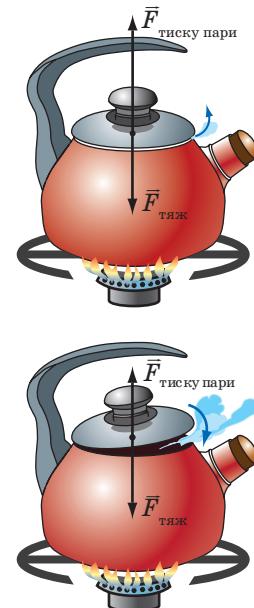
Вода в чайнику починає закипати, тиск пари під кришкою збільшується. У результаті настає момент, коли сила тиску пари стає більшою за силу тяжіння, що діє на кришку, і кришка підстрибує. У цей момент частина пари виходить назовні, сила тиску пари на кришку зменшується і сила тяжіння повертає кришку на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

Отже, в описаній системі, що 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.

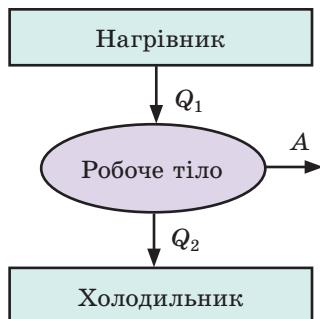
Якщо з кришкою чайника з'єднати якийсь механізм, дістанемо найпростішу модель теплового двигуна.

**Тепловий двигун** — це машина, яка працює циклічно й 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

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  $\eta$  обчислюють за формулою:

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

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

Найчастіше ККД подають у відсотках:

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

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).

### 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.

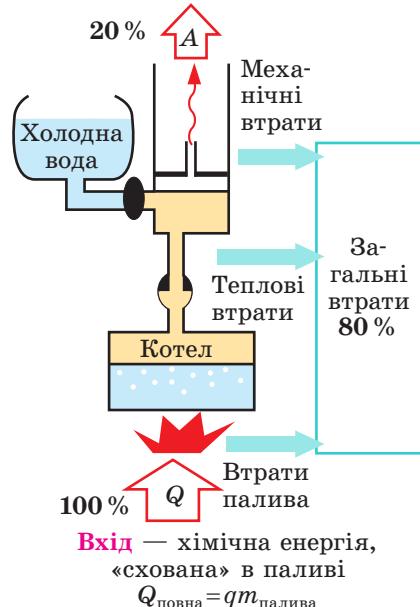
Принцип дії теплових машин: робоче тіло одержує певну кількість теплоти від нагрівника; частина цієї теплоти перетворюється на механічну енергію (робоче тіло виконує роботу), а частина — віддається холодильнику.

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

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

**Вихід** — механічна енергія руху вала двигуна

$$A_{\text{кор}} = Pt$$



**Вхід** — хімічна енергія, «схована» в паливі

$$Q_{\text{повна}} = qm_{\text{палива}}$$

Рис. 16.3. ККД теплових двигунів і схема втрат енергії



### Контрольні запитання

- Що таке тепловий двигун?
- Назвіть основні частини теплового двигуна.
- У чому полягає принцип дії теплового двигуна?
- Назвіть основні види втрат енергії в теплових двигунах.
- Дайте означення ККД теплового двигуна.
- Чому ККД теплового двигуна завжди менший від 100 %?



### Вправа № 16

- Під час повного згоряння палива у двигуні виділилося 500 кДж теплоти. У результаті двигун виконав корисну роботу, що дорівнює 125 кДж. Визначте ККД теплового двигуна.
- Під час роботи теплового двигуна використано 0,5 кг дизельного палива. При цьому двигун виконав корисну роботу, що дорівнює 7 МДж. Обчисліть ККД двигуна.

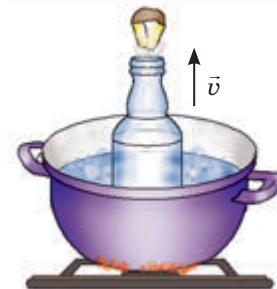
3. Яку корисну роботу виконає тепловий двигун, ККД якого становить 20 %, якщо в ньому згорить 10 л бензину?
4. Яку середню потужність розвиває двигун мотоцикла, якщо за швидкості руху 90 км/год витрата бензину становить 4 кг на 100 км шляху? ККД двигуна дорівнює 25 %.
5. Скористайтеся додатковими джерелами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



### Експериментальне завдання

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

(Під час проведення досліду не можна нахилятися над каструлєю!)



### 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. З 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 та 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 ХХ 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 °C. 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 Otto* (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

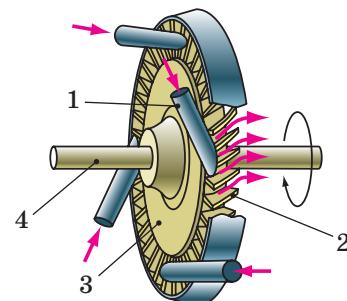


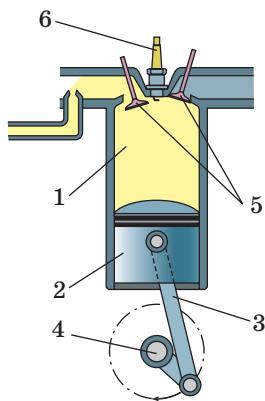
Рис. 17.2. Схема будови найпростішої парової турбіни:  
1 — сопла; 2 — лопаті;  
3 — диск; 4 — вал



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

Двигун внутрішнього згоряння (рис. 17.5) складається із циліндра (1), в якому пересувається 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.

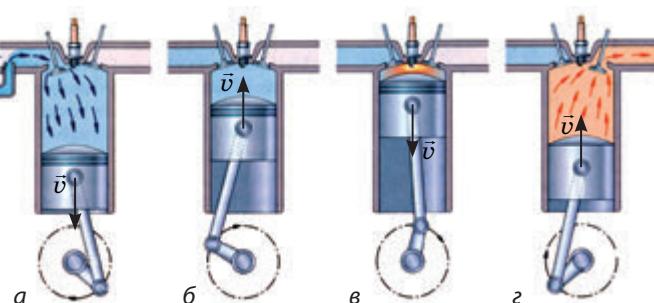
У верхній частині циліндра є два канали, закриті клапанами (5). Через впускний клапан пальна суміш (суміш повітря з бензином або газом) надходить до циліндра; через випускний клапан викидаються відпрацьовані гази. Крім клапанів у верхній частині циліндра деяких двигунів розміщено свічку (6) — пристрій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

### 3 Розглядаємо роботу чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння

Робочий цикл чотиритактного двигуна складається відповідно з чотирьох тактів (рис. 17.6).

*I 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 I такту впускний клапан закривається.

*II 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).**

Розжарені гази штовхають поршень униз. Рух поршня передається шатуну, який штовхає колінчастий вал і примушує його оберта-тися, — 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 відпрацьованіх 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.

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



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

**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 є досить досконалими, адже продукти реакції є «звичайними» сполуками. Дійсно, вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) входить до складу повітря, а вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ) наявна всюди навколо нас. Ці речовини є екологічно чистими, тобто не забруднюють природу. Проте не слід робити занадто квалітивих висновків.

По-перше, практично всі види палива містять невелику кількість Сульфуру, який з 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 ( $\text{CO}$ ).

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 та обертає її.

Ше 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 навколошнього середовища через шкідливі викиди 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 пального суміші в циліндрі дизельного двигуна під час стискання збільшується?
4. Чому в парової турбіні температура відпрацьованої пари нижча від температури пари, що 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 пристрій 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 ХХ 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 яких потребує значних витрат, виникли «не від доброго життя». Адже саме у ХХ ст. різко зросло використання теплових машин — пристрій, що перетворюють енергію палива на інші види енергії (електричну, механічну). Ідеється насамперед про автомобілі та решту транспортних засобів, що використовують як джерело енергії продукти переробки *нафти* (бензин і дизельне паливо). Крім того, практично всюди для обігрівання житла та приготування їжі застосовують пристрій, 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 напрями розв'язання проблеми майбутнього «енергетичного голоду»*.

1. *Економія наявних викопних ресурсів*. Ідеється 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 переробляння на дизельне паливо олії, одержуваної з деяких рослин (наприклад, ріпаку).

3. *Використання альтернативних джерел енергії*. Насамперед ідеється про ядерну та термоядерну енергії. 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.

Невичерпним джерелом може стати термоядерна енергія (рис. 18.5). Запасів важкого водню — палива для термоядерного синтезу — у Світовому океані вистачить на багато тисячоліть.

## 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



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

**Рис. 18.3.** Вітрогенератор

**Рис. 18.4.** Панель сонячних батарей

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».

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 невеликим споживанням енергії.

**?** 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 і щодо 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 ХХ 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 вуглексілого газу;



**Рис. 18.5.** Загальний вигляд дослідної термоядерної установки



**Рис. 18.6.** Зовні електричні автомобілі зовсім не відрізняються від своїх «бензинових братів»

- створення екологічно чистих електромобілів (рис. 18.6). Електромобілі практично не забруднюють довкілля: в них використовують електричний двигун, що живиться від акумуляторів;
- 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 ( $\text{CO}_2$ ), який у великої кількості стає дуже небезпечним. За оцінками вчених, за 200 років інтенсивної роботи теплових машин в атмосферу було викинуто близько одного трильйона ( $10^{12}$ ) тонн  $\text{CO}_2$ . 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 випромінювалось (поверталось) 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  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Але навіть це невелике нагрівання вже призвело, на думку багатьох учених, до глобальних змін клімату. Якщо ж середня температура поверхні Землі підвищиться на  $2^{\circ}\text{C}$ , то неминучими стануть глобальні катаklізми: 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  $\text{CO}_2$  (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 та термоядерної енергій.

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. Одним із найкращих джерел енергії є Сонце. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, де зараз використовується сонячна енергія і де вона може бути використана з часом.
2. Скористайтесь 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: *I. T. Швець, G. M. Щоголєв, B. I. Толубинський, Г. Л. Бабуха, О. А. Геращенко*.

Від 1982 р. інститутом керує відомий учений у галузі тепломасопереносу академік НАНУ *Anatolij Andrijovych Dolins'kyj*.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «Теплові явища»

У ході вивчення розділу I 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.



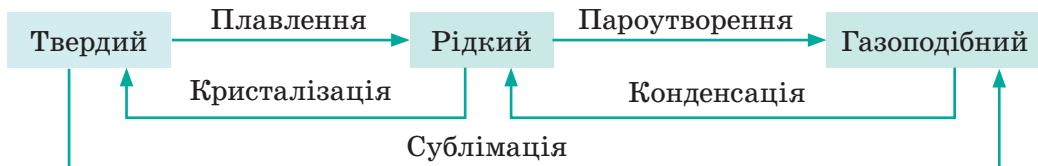
2. Ви довідалися, що зміну внутрішньої енергії в процесі теплопередачі характеризує фізична величина кількість теплоти  $Q$ . Як і енергія, кількість теплоти в СІ вимірюється в джоулях.
3. Ви дізналися про рівняння теплового балансу, яке відтворює закон перетворення та збереження енергії під час теплообміну.

## 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:

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

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	$\lambda$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\lambda = \frac{Q}{m}$
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 пристрой, так і теплових двигунів.

### ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ МАШИН



7. Ви довідалися про *фізичні величини, які характеризують паливо, нагрівальні пристрой, 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	$\eta$	%	$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}} \cdot 100\%$
ККД теплового двигуна	$\eta$	%	$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}} \cdot 100\%$

## Завдання для самоперевірки до розділу I «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;	в) розмір його молекул;
б) маса його молекул;	г) швидкість руху його молекул;
- 2.** (1 бал) Після вимкнення 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;	в) кульку занесли в тепле приміщення;
б) кулька лопнула;	г) кулька повільно опустилася на підлогу.
- 4.** (1 бал) Мідна деталь під час нагрівання розширюється. При цьому збільшується:
 

а) відстань між атомами Купруму;	в) кількість атомів у деталі;
б) розмір атомів Купруму;	г) густина міді.
- 5.** (2 бали) Яка кількість теплоти виділиться під час охолодження 2 кг алюмінію на  $50^{\circ}\text{C}$ ?
 

а) 920 кДж;	б) 100 кДж;	в) 420 кДж;	г) 920 кДж.
-------------	-------------	-------------	-------------
- 6.** (2 бали) Спекотного літнього дня хлопець і дівчинка були 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  $25^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ . 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.

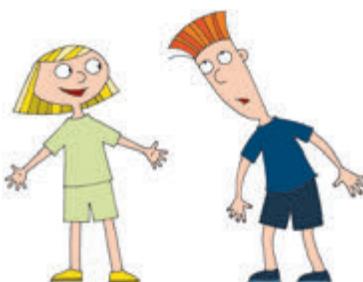
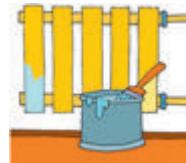
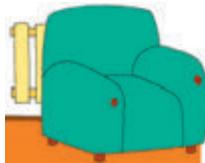
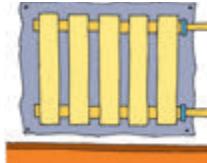


Рис. 1



Рис. 2

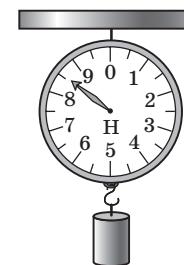
- 9.** (2 бали) Які з наведених дій приведуть до теплозбереження? Позначте всі правильні відповіді.



- а) прикриття вентиляційної решітки      б) розміщення за радіатором захисного 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 води від 10 до 60 °C?

- 11.** (3 бали) За даними рис. 3 обчисліть кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання зображеного сталевого циліндра від 0 до 12 °C.



- 12.** (3 бали) На скільки градусів можна нагріти 510 г міді, якщо використати таку саму кількість теплоти, яка виділяється під час охолодження 2 л олії на 40 °C?

- 13.** (4 бали) Відомо, що кожен кілограм тіла людини за 1 с випромінює в навколошне середовище приблизно 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 °C? Вважайте, що на нагрівання кулі було витрачено 80 % її механічної енергії.

- 15.** (4 бали) Визначте, якою була початкова температура латунного циліндра (рис. 4), якщо після його занурення вода в мірному циліндрі охолола від 37 до 20 °C. Втратами енергії знехайтесь.

Рис. 3

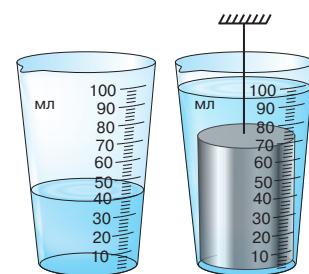


Рис. 4

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

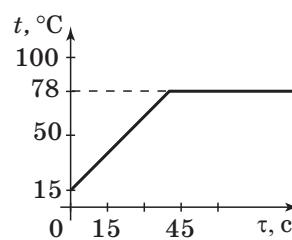


Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## 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) легко змінюють свої розміри;  
б) притягуються одна до одної;  
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) 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, що виділяє речовина в ході цього процесу.
- |                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 1 Вода в калюжі перетворилася на лід. | <b>A</b> $Q=qt$          |
| 2 Господар запалив дрова в каміні.    | <b>B</b> $Q=rm$          |
| 3 Над річкою утворився туман.         | <b>C</b> $Q=\lambda m$   |
|                                       | <b>D</b> $Q=cmt\Delta t$ |
- 10.** (2 бали) 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 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 автомобіля на всьому шляху, якщо ККД його двигуна 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. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*



Тренувальні тестові завдання з комп’ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## Що таке теплові трубки

Ви вже знаєте, що одні з найкращих провідників тепла — метали, а серед них «рекордсменами» є мідь, срібло, алюміній. І коли у вас запитають: «Як найшвидше передати тепло з однієї ділянки до іншої?», — ви, безумовно, згадаєте: якщо один кінець мідного (або алюмінієвого, або срібного) 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

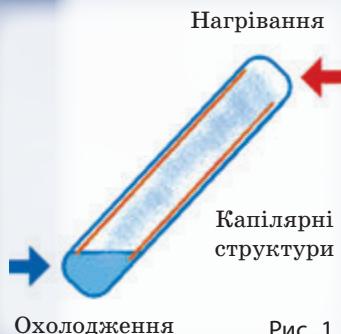


Рис. 1

рекордсменами. Проте інженери розв'язали й таке завдання, а винайдений пристрій назвали *тепловою трубкою*.

Пояснимо принцип її дії (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

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 напілених 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

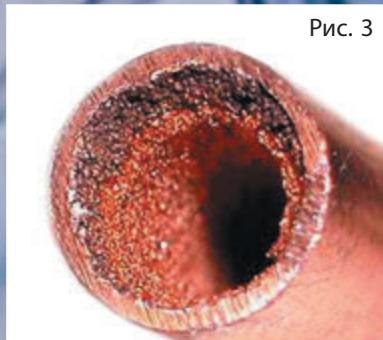


Рис. 3



Рис. 4

## Ефект «пам'яті форми»

Ви вже дізналися про найпростіші перетворення речовини: тверде тіло — рідина; рідина — газ. Також ви ознайомилися з четвертим станом речовини — плазмою. Однак це не всі можливі перетворення. У ХХ ст. фізики виявили надзвичайно цікаве явище, що згодом набуло широкого застосування. Ідеється 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 проектів

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 вчених у розвиток нанотехнологій.
14. Джеймс Прескотт Джоуль — видатний англійський фізик.
15. Вплив теплових двигунів на навколишнє середовище.
16. Глобальне потепління — загроза людству?
17. Альтернативні джерела енергії.
18. Побутові пристрої, що працюють за рахунок енергії сонячного випромінювання.

## Теми експериментальних досліджень

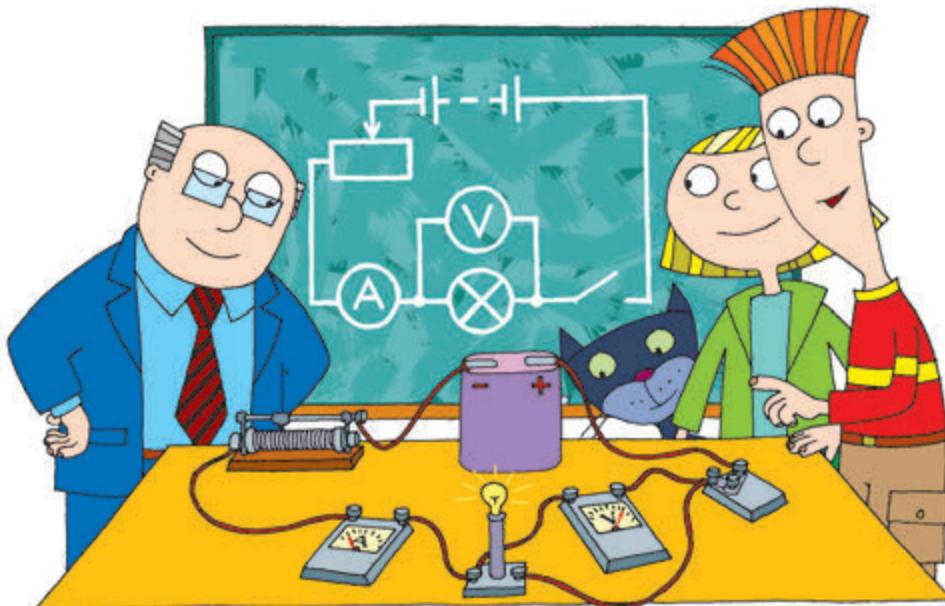
1. Вивчення теплопровідності різних матеріалів.
2. Вирощування кристалів із різних видів солей.
3. Дослідження кипіння води та залежності зміни температури кипіння води від зовнішнього тиску й наявності домішок.
4. Створення «холодильників», які не використовують електроенергію.
5. Створення двигуна, який використовує енергію свічки.

*Перед початком роботи над проектом, рефератом, проведенням експериментального дослідження уважно ознайомтеся з порадами на с. 227–228 підручника.*

# РОЗДІЛ III

## 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 дізнаєтесь, що називають електричним колом, і зможете його скласти
- Ви знаєте про існування електричного струму, а тепер довідаєтесь, 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 рухаються 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, і гравітаційна взаємодія між ними дуже слабка, — вона 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, менш ніж 150 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 натирає хутром шматок бурштину і спостерігав, як після цього бурштин починає 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 еbonітова паличка в результаті тертя об вовну або паличка з оргскла, якщо її потерти об шовк або 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):

$$[q] = 1 \text{ Кл.}$$

Ця одиниця — похідна від основних одиниць СІ (визначення кулона буде 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 еbonітовій паличці, потертіх об вовну,



**Рис. 19.1.** Щоб наелектризувати паличку з оргскала, 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

прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці зі скла, потертій об шовк або папір, — позитивним.

2. Тіла, що мають *заряди одного знака, відштовхуються*; тіла, що мають *заряди протилежних знаків, — притягуються* (рис. 19.3).

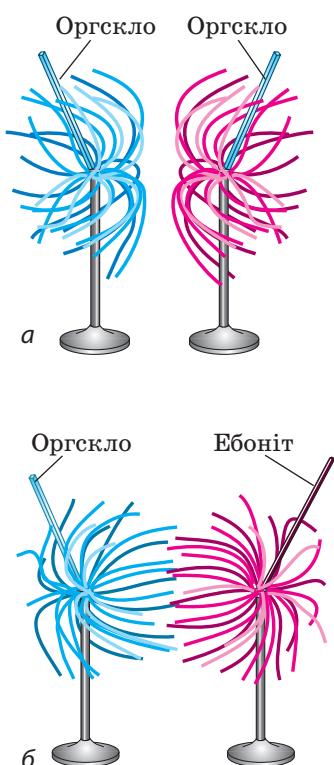
3. Носієм електричного заряду є частинка — *електричний заряд не існує окремо від частинки*. Під час електризації тіло приймає або віддає деяку кількість частинок, що мають електричний заряд\*. Однією з негативно заряджених частинок є *електрон*, а однією з позитивно заряджених — *протон* (протони входять 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 є *кратними певному найменшому (елементарному) заряду*:

$$q=Ne,$$

де  $q$  — заряд фізичного тіла;  $N$  — ціле число;  $e$  — елементарний заряд.



**Рис. 19.3.** Одноіменно заряджені паперові смужки відштовхуються (а); різноіменно заряджені — притягуються (б)

Носієм найменшого негативного заряду є електрон. Цей заряд позначають символом  $e$ , а значення записують так:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Носієм найменшого позитивного заряду є протон. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона:  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

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*.

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 заряди. Однотипні заряджені тіла відштовхуються, а різнонайменні 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

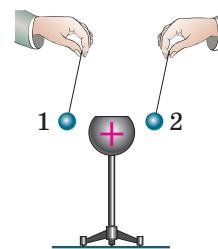


- Що називають електричним зарядом?
- Назвіть одиницю електричного заряду.
- Які роди зарядів існують?
- Який рід заряду має ебонітова паличка, потерта об вовну? паличка зі скла, потерта об шовк?
- Як взаємодіють тіла, що мають однотипні заряди?
- З яких частинок складається атом?
- Які частинки входять до складу атомного ядра?
- Яка частинка має найменший негативний заряд?
- Найменший позитивний заряд?
- Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?

### Вправа № 19



- На рисунку зображене позитивно заряджене тіло й підвішені на нитках кульки 1 і 2, що мають заряди невідомих знаків. Визначте знаки зарядів кульок 1 і 2.
- На тонкій шовковій нитці висить заряджена паперова кулька. Як, маючи ебонітову паличку та шматок вовни, визначити знак електричного заряду кульки?
- Атом, ядро якого має 12 протонів, утратив 2 електрони. Скільки електронів залишилося в атомі?
- Скільки надлишкових електронів має бути передано тілу, щоб воно отримало заряд, який дорівнює  $-1 \text{ Кл}$ ?
- Скориставшись додатковими джерелами інформації або власним досвідом, наведіть декілька цікавих прикладів взаємодії заряджених тіл.
- 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  $4 \times 15 \text{ см}$ , поліетиленову смужку розміром  $2 \times 3 \text{ см}$ , підвішену на нитці, пластмасову ручку. Проведіть відповідний експеримент.



**Відеодослід.** Перегляньте відеоролик і поясніть спостережуване явище.

## 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-Артемовський, 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.

Від 1998 р. посаду ректора ХНУ обіймає академік НАН України Віль Савбанович Бакіров.



## § 20. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Згадайте, як під час розчісування сухе й чисте волосся «тягнеться» за пластиковим 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 з 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, еbonітова паличка, шматок вовняної тканини, аркуш паперу та пластина з оргскла.

Наелектризуємо еbonітову 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

\* Дуже м'яким простим олівцем замалюйте клаптик паперу і натріть цим клаптиком кульку.

відхилятися від вертикалі. Якщо ж зупинити зближування, то кулька так і залишиться неприродно відхиленою (рис. 20.1, а). Понад те, піднявши пластину над кулькою, ми можемо змусити кульку завмерти в ще більш не природному 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 —  $\vec{F}_{\text{ел}}$ ).

## 2 Даємо означення електричного поля

З описаного вище експерименту можна зробити висновок про те, що *наелектризована пластина спричинює певні зміни в просторі навколо себе*. А саме: простір 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.

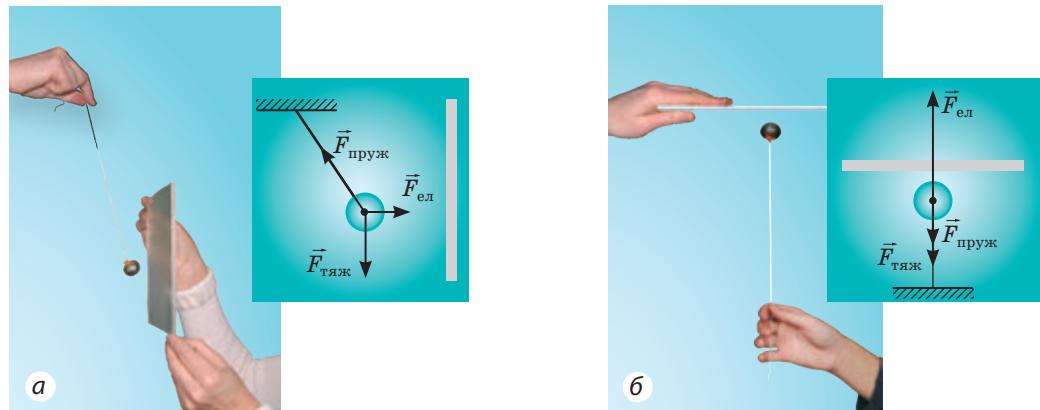
Таким чином, електрична взаємодія наелектризованої пластини й зарядженої кульки здійснюється за допомогою електричного поля. Коли заряджена кулька потрапляє в електричне поле наелектризованої пластини, це поле починає діяти на кульку з деякою силою, в результаті чого кулька відхиляється.

Силу, з якою електричне поле діє на заряджені частинки або тіла, називають *електричною силою*  $\vec{F}_{\text{ел}}$ .

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  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сила натягу нитки  $\vec{F}_{\text{пруж}}$  будуть скомпенсовані силою  $\vec{F}_{\text{ел}}$ , що 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 натертого 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 його дію кулька набуває руху, відхиляючись на деякий кут.

Ми виявили лише деякі властивості електричного поля. Детальніше про нього ви дізнаєтесь в старших класах, а поки що звернемо увагу ось на що: *електричне поле може існувати будь-де, навіть у вакуумі*.

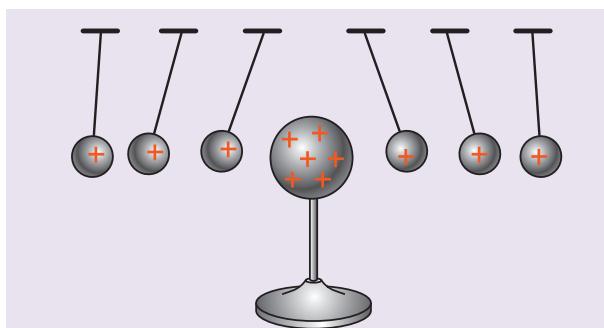
### 4 Зображення електричного поля графічно

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; 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, або лінії електричного поля**, — це умовні лінії, уздовж дотичних до яких на заряджене тіло діє сила з боку електричного поля.

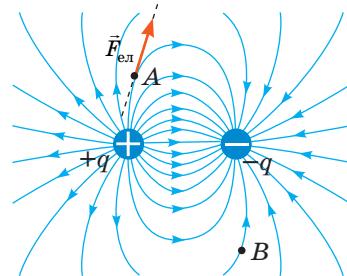
За напрямком силових ліній можна визначити напрямок, у якому електричне поле діє на електричний заряд. Щільність силових ліній на рисунку залежить від того, наскільки сильним є електричне поле: чим сильніше електричне поле, тим щільніше розташовані лінії.

Розглянемо рис. 20.4, на якому графічно зображене електричне поле, створене двома різномінними зарядами. Визначимо, куди напрямлена сила  $\vec{F}_{\text{ел}}$ , що діє на позитивний заряд, поміщений у точку A поля. Для цього проведемо дотичну до силової лінії в цій точці. Сила  $\vec{F}_{\text{ел}}$  буде діяти вздовж цієї дотичної в напрямку силової лінії. Зрозуміло: якщо в точку A помістити негативний заряд, то напрямок сили буде протилежним напрямку сили  $\vec{F}_{\text{ел}}$ .

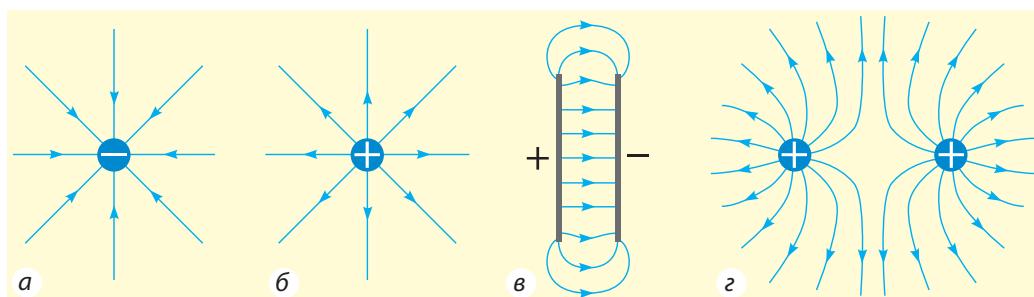
?

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 лініями, але можуть бути й прямими. Наприклад, лінії електричного поля рівномірно зарядженої кульки, віддаленої від інших заряджених тіл, — прямі лінії (рис. 20.5, а, б). Прямими є і лінії електричного поля між двома паралельними пластинами, що мають однакові за значенням і протилежні за знаками заряди (рис. 20.5, в).



**Рис. 20.4.** Картина силових ліній електричного поля, створеного системою двох однакових за модулем різномінними зарядів ( $+q$  і  $-q$ ).  $\vec{F}_{\text{ел}}$  — сила, з якою це електричне поле діє на позитивний заряд, розташований у точці A



**Рис. 20.5.** Картини силових ліній електрических 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 спричиняє погіршення пам’яті, підвищенню стомлюваності 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 самочуття 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. Який напрямок узято за напрямок ліній електричного поля?
7. Який вигляд має картина силових ліній електричного поля позитивно заряденої сфери? негативно заряденої сфери?
8. Який вплив на організм людини чинять електричні поля, створювані різними електротехнічними пристроями?

### Вправа № 20



1. На рис. 1 зображено 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, що діє на позитивний заряд, розташований у точці A; 4) напрямок сили, що діє на негативний заряд, розташований у точці B.

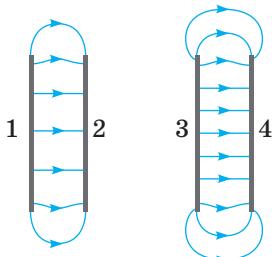


Рис. 1

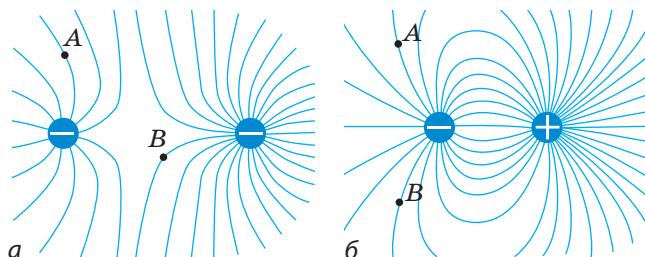


Рис. 2

3. Між двома 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.
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<sup>3</sup>, середня густина — 0,6 г/см<sup>3</sup>.



Рис. 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*. Скориставшися додатковими джерелами інформації, дізнайтесь 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 наелектризований 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 Гільберт (1544–1603) — англійський фізик і лікар, засновник науки про електрику

Вважають, що систематичне вивчення електромагнітних явищ розпочав англійський учений *Вільям Гільберт* (рис. 21.1). Однак пояснити електризацію тіл змогли понад три століття потому. Після відкриття електрона фізики з'ясували, що частина електронів може 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 з 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 виникнення цього заряду.

Перед натиранням і паличка, і вовна є електрично нейтральними. А от у разі щільного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, частина електронів переходить з одного тіла на інше. (Відстані, на які при цьому переміщаються електрони, не перевищують міжатомних відстаней.) 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 вовна — позитивно. Аналогічного результату можна досягти, якщо розчесати сухе волосся пластмасовим гребінцем (рис. 21.2).

Слід зазначити, 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.

## 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 виявляються зарядженими, причому їхні заряди будуть рівними за модулем і протилежними 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:

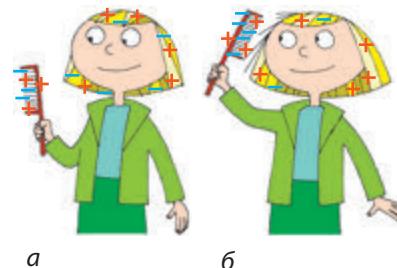
$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряди тіл, що створюють електрично замкнену систему ( $n$  — кількість таких тіл).

*Під електрично замкненою системою розуміють таку систему тіл, у яку не проникають заряджені частинки ззовні і яка не втрачає «власних» заряджених частинок.*

## 3 Заземлюємо прилади та пристрої. Розрізняємо провідники та 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 *проводниками*. 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,



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)

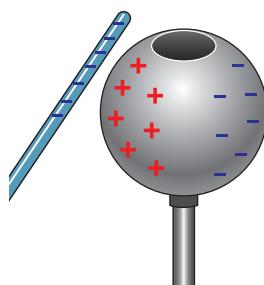


а



б

**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 близьча 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, оргекло, еbonіт, 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 негативно заряджену еbonітову паличку до незарядженої металевої сфери, розташованої на ізольованій підставці. На короткий час 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 еbonітової 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!

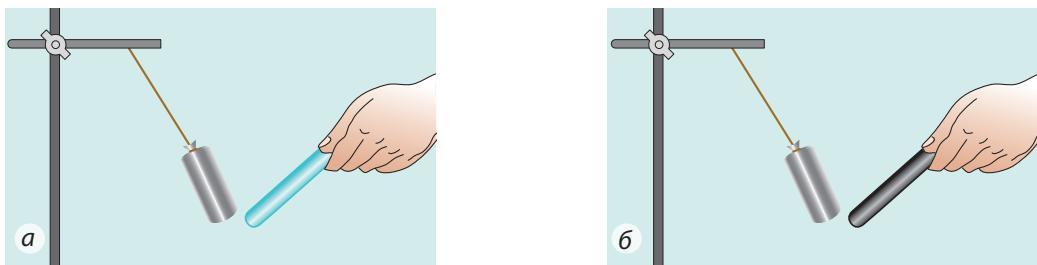


Рис. 21.5. До запитання в § 21

тілами не було, описаний процес називають *електризацією через вплив* або *електростатичною індукцією*.

Пояснюються 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 більшій (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 еbonітової 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, унаслідок чого змінюється форма електронної хмари — вона стає витягнутою (рис. 21.6). У результаті на більшій до палички поверхні

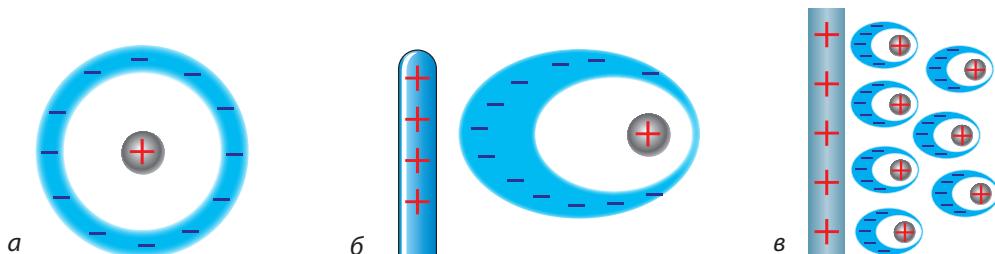
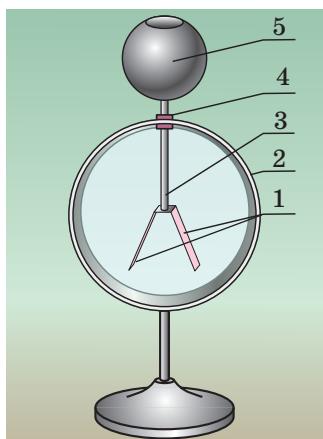
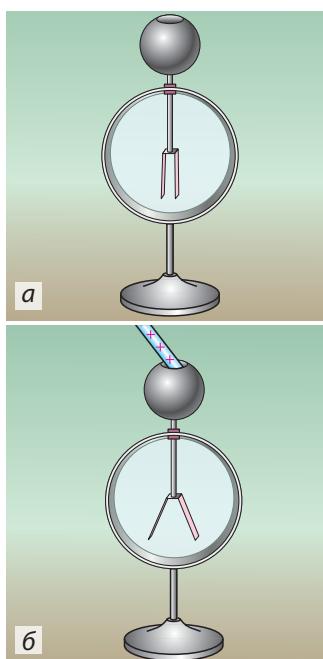


Рис. 21.6. Унаслідок дії зовнішнього електричного поля форма електронної хмари змінюється. Форма електронної хмари: за відсутності поля (а); за наявності поля (б). На поверхні паперу, більшій до позитивно зарядженої палички, утворюється негативний заряд (в)



**Рис. 21.7.** Будова електроскопа: 1 — індикатор (паперові смужки); 2 — металевий стрижень; 3 — корпус; 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)

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 тілі 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. У § 20 ішлося про те, 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 однайменного заряду вони почнуть відштовхуватися і 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: до одного кінця металевого стрижня (3) прикріплюють смужки, а другий кінець виводять назовні. 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 і вимірювання електричного заряду можна застосовувати **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.

За електричними властивостями речовини поділяють на провідники і діелектрики. Технічний прийом, який дозволяє розрядити будь-яке заряджене тіло шляхом з'єднання цього тіла провідником із землею, називають **заземленням**.

Унаслідок дії електричного поля на провідник відбувається процес перерозподілу зарядів усередині провідника — електростатична індукція. Унаслідок дії електричного поля на діелектрик відбувається поляризація діелектрика.

Електроскоп — прилад для виявлення електричного заряду.



### Контрольні запитання

- Що і чому відбувається під час щільного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів?
- Чому під час тертя еbonітової палички об вовняну тканину електризуються обидва тіла?
- Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
- У чому полягає відмінність провідників і діелектриків?
- Що називають заземленням?
- Як за допомогою негативно зарядженого тіла зарядити інше тіло позитивно?
- Поясніть, чому будь-яке незаряджене тіло завжди притягується до тіла, яке має електричний заряд.
- Для чого застосовують електроскоп? Як він сконструйований і яким є принцип його дії?
- Чим електрометр відрізняється від електроскопа?



### Вправа № 21

- Чи відрізняється маса незарядженої палички з оргскала від маси тієї самої палички, зарядженої позитивно? Якщо відрізняється, то як?

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 іншу заряджену паличку (рис. 1, б). Визначте знак заряду палички.
4. Дві однакові провідні заряджені кульки торкнулися одна одної й відразу ж розійшлися. Обчисліть зарядожної кульки після дотику, якщо перед дотиком заряд першої кульки дорівнював  $-3 \cdot 10^{-9}$  Кл, а заряд другої кульки становив  $9 \cdot 10^{-9}$  Кл.
5. Як за допомогою негативно зарядженої металевої кульки, не зменшуючи її заряду, негативно зарядити таку саму, але незаряджену кульку?
6. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся, для чого використовують антистатик і як він «працює».

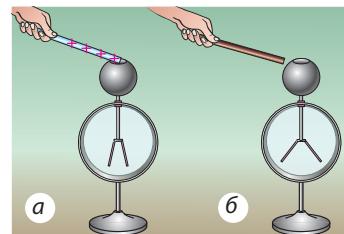


Рис. 1



### Експериментальні завдання

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 «флотиллю» рухатися.



Рис. 2



**Відеодослід.** Перегляньте відеоролик і поясніть спостережуване явище.

### Фізика і техніка в Україні



**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (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 ХХ 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, Е. О. Патона, Б. Е. Патона та багатьох інших. Від 1992 р. незмінний ректор університету — академік НАН України Михайло Захарович Згуровський.

**i**

## § 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. З 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.

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 уведення такої моделі спричинена тим, що в загальному випадку взаємодія заряджених тіл залежить від багатьох чинників, отже, не існує єдиної простоти формул, яка описує електричну взаємодію для будь-якого довільного випадку.



**Рис. 22.1.** Шарль Огюстен Кулон (1736–1806) — французький фізик і військовий інженер. У 1785 р. сформулював основний закон електростатики, пізніше названий його ім'ям

**2**

### Встановлюємо, 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 скляній 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. Одноіменні заряди відштовхуються, тому кульки розходилися на деяку відстань. За кутом закручування дроту Кулон визначав силу взаємодії зарядів.

Потім, обертаючи кришку циліндра, дослідник змінював відстань між кульками та знову 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:

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

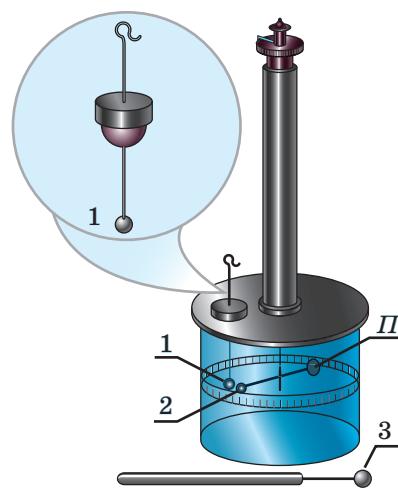
Для виявлення залежності сили  $F$  від зарядів кульок Кулон застосував такий прийом. Спочатку вчений вимірював силу взаємодії двох кульок — 1 і 2, які мали одинаковий заряд  $q$  ( $q_1=q$ ;  $q_2=q$ ).

Потім дослідник торкався кульки 1 незарядженою кулькою 3. Розміри кульок були одинаковими, тому заряд розподілявся між кульками порівну, тобто на кульці 1 залишався заряд  $\frac{q}{2}$ . Після цього Кулон вимірював

силу взаємодії зарядженої кульки 1 ( $q_1 = \frac{q}{2}$ ) і зарядженої кульки 2 ( $q_2 = q$ ).

Продовжуючи ділити заряди кульок і здійснюючи вимірювання, учений перевірився, 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  $\Pi$ . 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\*  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .

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).

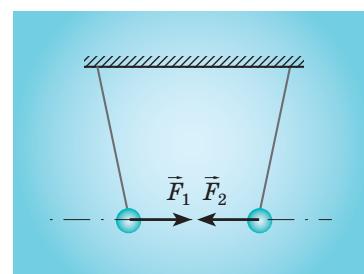
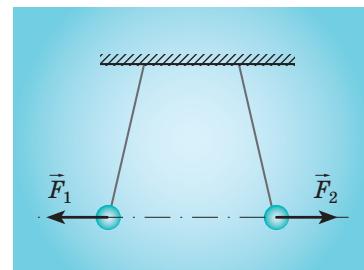
Скориставшись законом Кулона, визначте значення цієї сили.

### 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,

\* У багатьох середовищах сила взаємодії буде значно меншою, ніж у вакуумі. У повітрі порівняно з вакуумом вона зменшується незначно.



**Рис. 22.3.** Сили електричної взаємодії ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) напрямлені вздовж умовної прямої, що з'єднує точкові заряди



**Рис. 22.4.** Якби на днищі судна й на відстані 1 м під його днищем можна було розмістити однотипні заряди по 1 Кл кожний, то вдалося б перевертити силу земного тяжіння й без жодних спеціальних пристрій підняти судно

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:**

$$r = 0,3 \text{ м}$$

$$F = 32 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$$

$$q_1 = -40 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

**Знайти:**

$$N_2 = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

$$\text{За законом Кулона } F = \frac{k|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

$$\text{Отже, } Fr^2 = k|q_1| \cdot |q_2| \Rightarrow |q_2| = \frac{Fr^2}{k|q_1|}.$$

$$\text{Але } |q_2| = N_2|e|, \text{ тому } N_2|e| = \frac{Fr^2}{k|q_1|}. \text{ Звідси маємо:}$$

$$N_2 = \frac{Fr^2}{k|q_1| \cdot |e|}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N_2] = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}}{\frac{\text{Кл}^2}{\text{Кл}}} = 1 \text{ (кількість електронів — безрозмірнісна величина);}$$

$$N_2 = \frac{32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,09}{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = \frac{32 \cdot 9 \cdot 10^{-8}}{9 \cdot 4 \cdot 16 \cdot 10^{-19}} = 5 \cdot 10^{10}.$$

*Відповідь:*  $N_2 = 5 \cdot 10^{10}$ .



### Підбиваємо підсумки

Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна захтувати 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 між ними:  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ . 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 направлена сила Кулона?

**Вправа № 22**

- На рис. 1 зображенено дві пари нерухомих невеликих кульок. Зобразіть сили Кулона, що діють на кожну кульку.
- Як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо модуль кожного з них збільшити у 2 рази?
- Як змінилася відстань між двома точковими зарядами, якщо відомо, що сила їхньої взаємодії зменшилася в 9 разів?
- 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.
- Дві однакові провідні кульки із зарядами  $-5 \text{ нКл}$  і  $+15 \text{ нКл}$  торкнулись одна одної та розійшлися на відстань 60 см. Визначте силу взаємодії кульок. Вважайте кульки точковими зарядами.
- На рис. 2 зображенено 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?

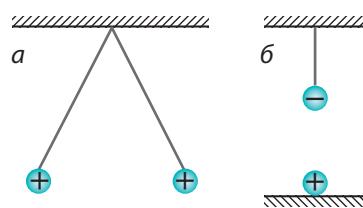


Рис. 1

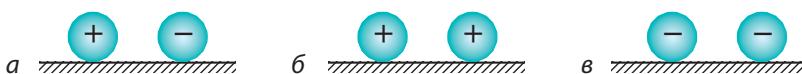


Рис. 2



- Установіть відповідність між властивістю, що лежить в основі дії пристрою, та назвою цього пристрою.
 

1 Під час нагрівання гази розширяються.	A мензурка
2 Одноименні заряди відштовхуються.	B тепловий двигун
3 Усі тіла притягуються до Землі.	C терези
4 Рідина зберігає об'єм.	D біметалева пластинка

- A мензурка  
B тепловий двигун  
C терези  
D біметалева пластинка  
E 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, збегнуть: «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, тому що їхня робота заснована на дії електричного струму. А що таке електричний струм?

### 1 Даємо означення електричного струму

Проведемо дослід. Поставимо на столі два електрометри (*A* і *B*) і зарядимо один із них, наприклад електрометр *A* (рис. 23.1, *a*). З'єднаємо кондуктори електрометрів металевим стрижнем, закріпленим на пластмасовій ручці. За відхиленням стрілок електрометрів видно, що заряд електрометра *A* зменшився, а незаряджений електрометр *B* 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 стрижнем пройшов *електричний струм*.

**Електричний струм** — це напрямлений рух заряджених частинок.

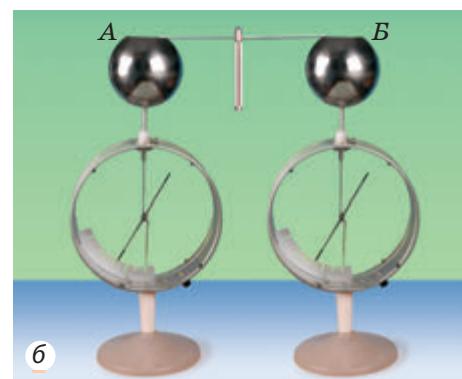
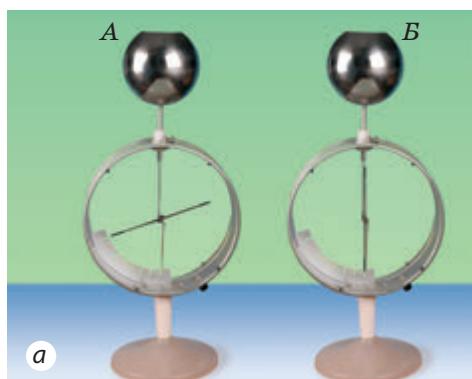
### 2 З'ясовуємо умови виникнення та існування електричного струму

З огляду на означення електричного струму сформулюємо першу умову для його виникнення та існування в будь-якому середовищі: *у середовищі повинні бути вільні заряджені частинки*. Такі частинки можуть переміщатися по всьому середовищу, — їх 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 вільних 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 *проводники*, *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 переїде 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 «мандрює» 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.

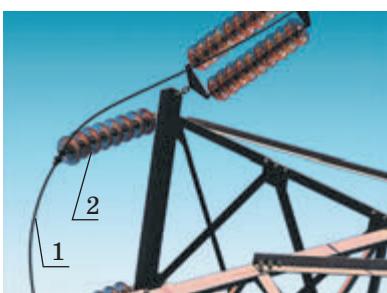
**Діелектрики** — речовини та матеріали, які погано проводять електричний струм.

Діелектриками є багато твердих речовин (ебоніт, порцеляна, гума, скло та ін.), рідин (дистильована вода, гас, спирт, бензин та ін.) і 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 — хороших 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, силіцій, арсен), які називають **напівпровідниками**. Зазвичай вони погано проводять електричний струм і їх можна віднести до діелектриків. Однак якщо підвищити температуру або збільшити освітленість, 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 їх 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.



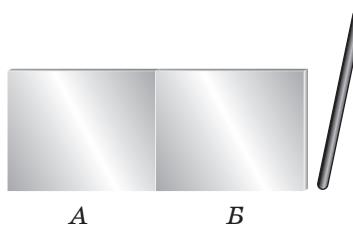
## Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм?
2. Сформулюйте умови виникнення та існування електричного струму.
3. Які речовини відносяться 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 дуже великою 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 змінятся 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. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, які речовини є найкращими діелектриками і де їх застосовують.
7. До двох з'єднаних металевих пластин *A* і *B* піднесли наелектризовану об вовну еbonітову паличку (див. рисунок).
  - 1) Якого заряду набуде пластина *A*? Пластина *B*?
  - 2) Чи залишиться пластини зарядженими, якщо:
    - а) роз'єднати пластини, не прибираючи палички?
    - б) прибрati паличку, а потім роз'єднати пластини?



**i**

## § 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 струму* виявляється в нагріванні провідника, в якому тече струм. Так, коли ви прасуєте, припаюєте деталь електричним паяльником, готуєте на електричній плиті, обігріваете кімнату електричним нагрівником, то використовуєте побутові прилади, функціонування яких ґрунтуються на тепловій дії електричного струму (рис. 24.1).

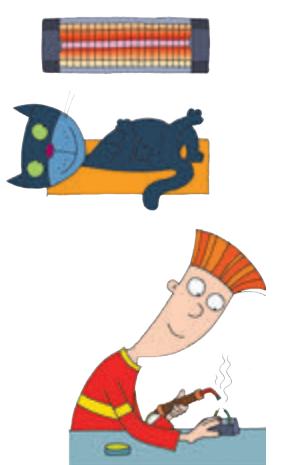
Теплову дію електричного струму широко використовують також у промисловості (зварювання, різання, плавлення металів) і сільському господарстві (обігрів теплиць та інкубаторів, сушіння зерна, сінажу).

Прояв тепової дії електричного струму можна спостерігати і 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 шкідливо. Наведіть інші приклади шкідливої теплової дії струму.

Якщо в коло ввімкнути електричну лампу розжарення, її нитка нагріється і почне випромінювати світло. У цьому випадку водночас із тепловою дією ми спостерігаємо *світлову дію струму*. До речі, в лампі



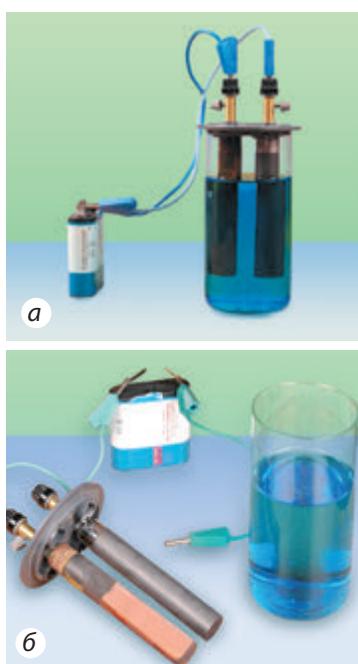
**Рис. 24.1.** Функціонування багатьох побутових пристріїв ґрунтуються на тепловій дії електричного струму



**Рис. 24.2.** Досить часто лісові пожежі спричиняються блискавкою



**Рис. 24.3.** Електричні лампи — пристрой, 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, що демонструє хімічну дію електричного струму: якщо протягом деякого часу пропускати струм через водний розчин купруму(II) сульфату (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 *енергозбережувальні лампи* — в них на світло перетворюється до 50 % електричної енергії (рис. 24.3, б, в).

?

Наведіть приклади світової дії струму в природі.

## 2 Спостерігаємо хімічну дію електричного струму

Коли через розчини солей, кислот, лугів проходить електричний струм, на електродах, занурених у розчин, відбуваються хімічні реакції. У такому випадку ми маємо справу з *хімічною дією струму*.

Так, якщо в посудину з водним розчином купруму(II) сульфату ( $\text{CuSO}_4$ ) опустити два вугільні електроди й пропустити через 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 дізнаєтесь 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 й пропустимо по проводу електричний струм. Цвях почне притягувати до себе залізні предмети, тобто виявити магнітні властивості (рис. 24.5).

Функціонування різноманітних електричних двигунів, електровимірювальних пристріїв можливе тільки завдяки *магнітній дії 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 купрум(ІІ) сульфату поступово збільшується, а якщо біля посудини помістити магнітну стрілку, вона відхиляється.

#### 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 стимулування 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. 24.5.** Під час пропускання струму цвях стає магнітом і притягує до себе залізні ошурки



**Рис. 24.6.** Робота електровимірювальних приладів і електрических двигунів ґрунтуються 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 дію 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 ґрунтуються 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 дізнайтесь 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 різномінених 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 різноїменні заряди не так просто, адже між ними існують сили притягання. Для розділення різноїменних 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** — пристрой, які перетворюють різні види енергії на електричну енергію.

2

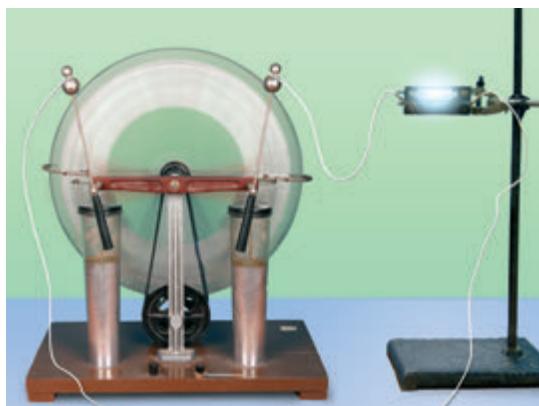
### Дізнаємося про різні види джерел електричного струму

Усі джерела електричного струму можна умовно розділити на фізичні і хімічні.

До *фізичних джерел електричного струму* прийнято відносити пристрой, 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 пристрой, в яких розподіл зарядів відбувається за рахунок енергії, що виділяється внаслідок хімічних реакцій. До хімічних джерел струму належать *галіванічні елементи* й *акумулятори*.



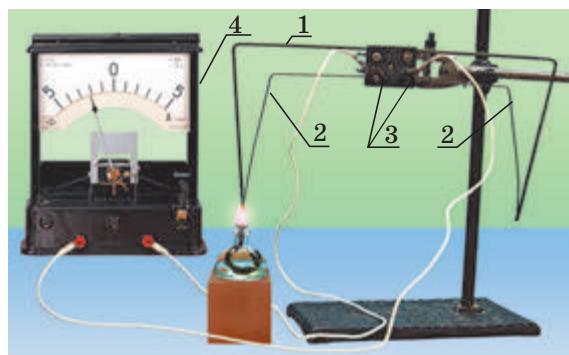
**Рис. 25.1.** Якщо різноїменно заряджені кондуктори електрофорної машини з'єднати з електричною лампою, в лампі виникне електричний струм. Лампа світиться, поки обертаються диски машини, — в цьому випадку механічна енергія перетворюється на електричну



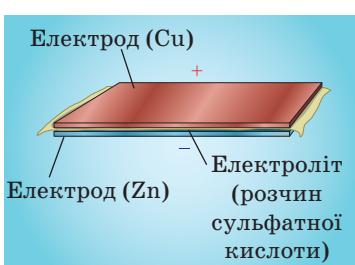
**Рис. 25.2.** Завдяки турбогенераторам, що перетворюють механічну енергію обертання турбін на енергію електричного струму, виробляють 80% споживаної у світі електроенергії



**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 Вольта (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 слабко-му розчині сульфатної кислоти. Виготовлений пристрій являє собою найпростіший **галванічний елемент** (рис. 25.5). Якщо з'єднати пластинки через **галванометр\***, то пристрій зафіксує наявність струму.

Гальванічний елемент створив італійський учений А. Вольта (рис. 25.6); він назвав його на честь свого співвітчизника — анатома і фізіолога Луїджі Гальвані (1737–1798). Досліди, описані Гальвані, 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 другий — негативного заряду. Коли запас речовин, що беруть участь у реакціях, виснажується, гальванічний елемент припиняє роботу.

\* Гальванометр — чутливий електровимірювальний пристрій, 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 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 зарядженим негативно, а електрод із плюмбум діоксиду — позитивно. При цьому сульфатна кислота перетворюватиметься на воду. Коли концентрація сульфатної кислоти зменшиться до певного граничного значення, акумулятор розрядиться — стане непридатним до роботи. 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 у 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 так звані літіййонні батареї, хоча вони є порівняно дорогими.



### Підбиваємо підсумки

Пристрої, що перетворюють різні види енергії на електричну енергію, називають джерелами електричного струму.

У джералах електричного струму відбувається розділення різномінних електричних зарядів, у результаті чого на одному полюсі джерела накопичується позитивний заряд, на другому — негативний, а отже, створюється електричне поле.

У джералах електричного струму робота з розділення різномінних 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 джералах електричного струму? 3. Чому для розділення різномінних зарядів необхідно виконати роботу? 4. За рахунок якої енергії може здійснюватися розділення різномінних 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, з'єднаних металевим провідником (див. рис. 23.1, б), підтримувати протилежні за знаком електричні заряди?
3. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи гідроелектростанції?
4. Чи зміниться дія найпростішого гальванічного елемента (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. Гальвані 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), переконайтесь, 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 зображені деякі електричні пристрой, ви дізнаєтесь, вивчивши матеріал цього параграфа.

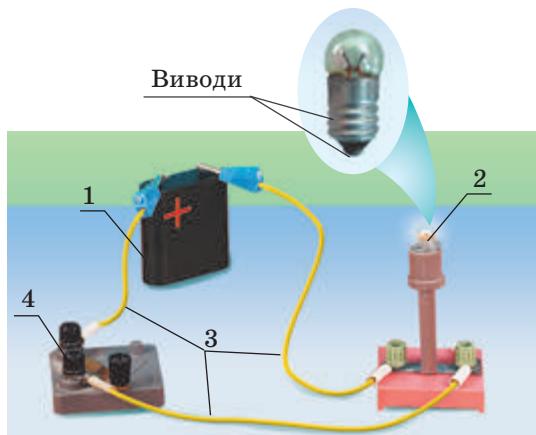
1

### 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).

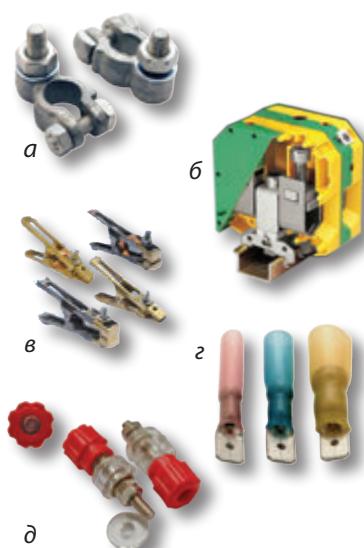
Щоб електричний пристрій працював, передусім необхідне *джерело струму*. У поданій моделі джерелом струму є батарея гальванічних елементів (1). Батарея має два виводи (полюси). Вивід батареї, на якому накопичується надлишковий позитивний заряд, позначений на ній знаком «+».

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:

- 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'єднання 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.

I, нарешті, останній елемент. Щоб було зручно вмикати й вимикати споживачі, використовують різноманітні замикальні (розмикальні) пристрої: ключ, рубильник, вимикач, кнопку або розетку. У моделі, що розглядається (див. рис. 26.1), таким пристроєм є ключ (4).

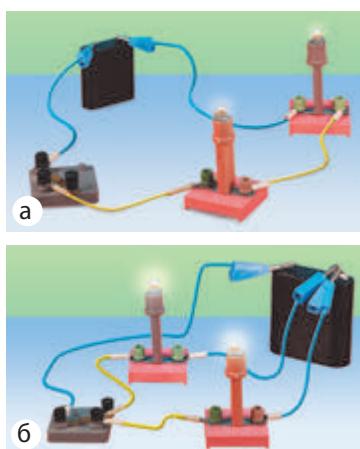
*З'єднані провідниками в певному порядку джерело струму, споживачі, замикальні (розмикальні) пристрої складають електричне коло.*

Зверніть увагу: в реальному пристрої важливим є *певний порядок з'єднання елементів електричного кола*.

На рис. 26.3 зображені два найпростіші електричні кола, що 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.

## 2 Знайомимося з механічним аналогом електричного кола

Щоб краще зrozуміти призначення елементів електричного кола, розглянемо його механічний аналог. Механічна модель (рис. 26.4) складається з двох наповнених водою посудин ( $P+$  і  $P-$ ), м'якої пластикової трубки (3), механічної вертушки (2) і... вашого товариша (1), завданням якого буде безперервне переливання води з посудини  $P-$  до посудини  $P+$ . Зануривши один кінець трубки в посудину



**Рис. 26.3.** Два способи з'єднання ламп в електричному колі: а — послідовне; б — паралельне

\* У поданий 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.

з більш високим рівнем води ( $P+$ ), створимо «водяний струм», який спричинятиме обертання вертушки.

Щоб вертушка не зупинялася, необхідно безперервно підтримувати «водяний струм». А він буде існувати, доки існує різниця рівнів води в посудинах, тобто доки ваш товариш переливатиме воду. І так само електричний струм буде існувати в колі, доки працює джерело струму. Безперервно «перетягуючи» відповідні 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.

**?** 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.

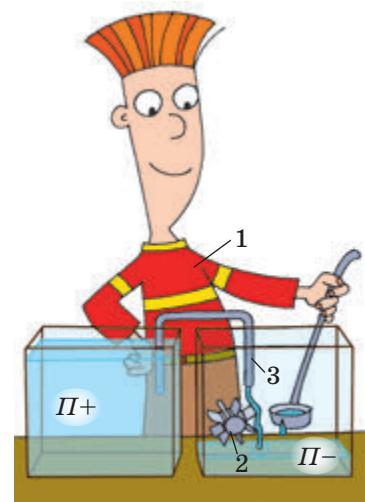
### 3

### Знайомимося з електричними схемами

Щоб показати, які саме електричні пристрой 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 (галванічного елемента або акумулятора та батареї гальванічних елементів або акумуляторів): прийнято, що довга риска позначає позитивний полюс джерела струму, а коротка — негативний.



**Рис. 26.4.** Механічний аналог електричного кола, поданого на [рис. 26.1](#). Відповідність елементів можна простежити за цифрами, якими вони позначені на рисунках

*Деякі умовні позначення, застосовувані на схемах*

Елемент електричного кола	Умовне позначення
Гальванічний елемент або акумулятор	— —
Батарея гальванічних елементів або акумуляторів	— — - —
З'єднання проводів	— —●—
Резистор	—□—
Електричний дзвінок	—○—
Штепсельна розетка	—>>—
Перетин проводів (без з'єднання)	— —
Затискачі для під'єднання якого-небудь пристроя	—○○—
Ключ	——
Електрична лампа	○○
Нагрівальний елемент	—□□□—
Запобіжник	—□—

Напрямок струму показують на схемах стрілкою.

*За напрямок струму в колі умовно 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, зображеніх 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 світиться. 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 світиться лампа і працюватиме електрообігрівач.



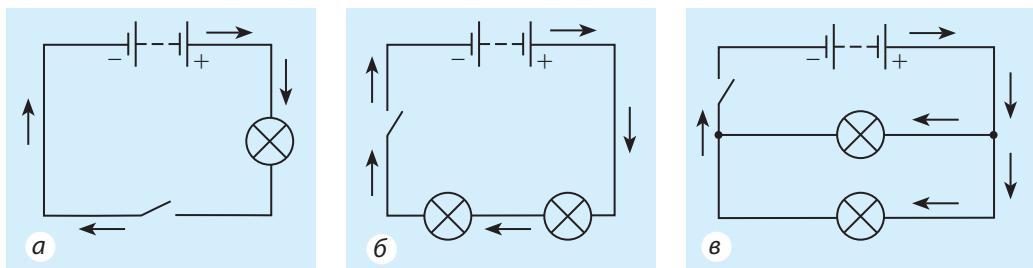
Чи буде працювати хоча б один споживач, якщо розімкнути тільки ключ  $K_1$ ? якщо замкнути тільки ключ  $K_1$ ? Якщо буде, то який?



### Підбиваємо підсумки

З'єднані провідниками джерело струму, споживач електричної енергії, замикальний (розмикальний) пристрій 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 електрических 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 позначені 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.



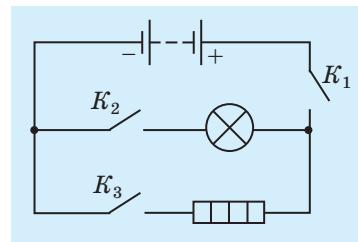
### Контрольні запитання

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 електрических колах використовують ключ?
5. Що називають електричною схемою?
6. Як на електрических схемах зображують гальванічний елемент? батарею гальванічних елементів? електричний дзвінок? ключ?
7. Який напрямок прийнято за напрямок струму в електричному колі?



### Вправа № 26

1. На рис. 1 зображене 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, і вкажіть напрямок струму в ньому.



**Рис. 26.6.** Схема вмикання електричної лампи та обігрівача

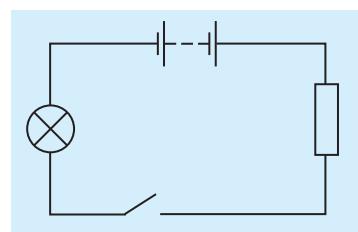


Рис. 1

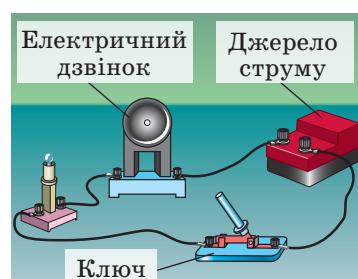


Рис. 2

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 на те, що завдання можна розв'язати двома способами.) Де можна застосувати таке з'єднання?
5. Електричне коло складається з батареї акумуляторів, дзвінка, ключа й лампи, причому лампа світиться весь час, а дзвінок вмикається тільки в разі замкнення ключа. Накресліть схему електричного кола.
6. Заповніть таблицю.



Назва фізичної величини	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 та 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. Від 2007 р. Інститут електродинаміки очолює академік НАН України Олександр Васильович Кириленко.

## § 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 (проводнику), як ви вже знаєте, є велика кількість вільних носіїв електричного заряду — електронів.

Коли у 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.

Якщо приєднати стрижень до джерела струму, електрони почнуть рухатися напрямлено і кількість електронів, що проходять за певний час через поперечний переріз в одному напрямку, істотно збільшиться. Отже, у цьому напрямку через поперечний переріз стрижня буде перенесено певний заряд.

**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  $t$ .

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.

Поперечний  
переріз

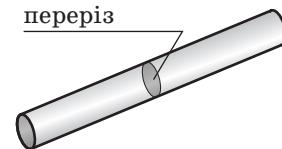


Рис. 27.1. Уявно розрізавши стрижень, одержуємо його поперечний переріз



Рис. 27.2. Андре Марі Ампер (1775–1836) — французький фізик, математик і хімік, один із засновників учения про електромагнітні явища. Ампер першим увів у фізику поняття електричного струму



**Рис. 27.3.** Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць (СІ)

## 2 Знайомимося з одиницею сили струму

Одиниця сили струму в СІ — ампер:

$$[I] = 1 \text{ A.}$$

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 (mA) і мікроампери (мкА), великої сили струму — кілоампери (kA).

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 в ході 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 привести 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:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}.$$

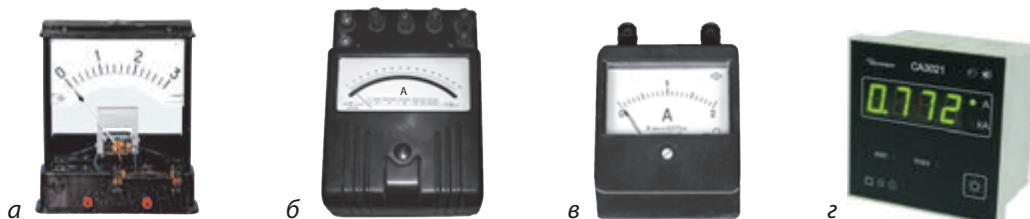
1 Кл — це заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 с при силі струму в провіднику 1 А.

### 4 Вимірюємо силу струму

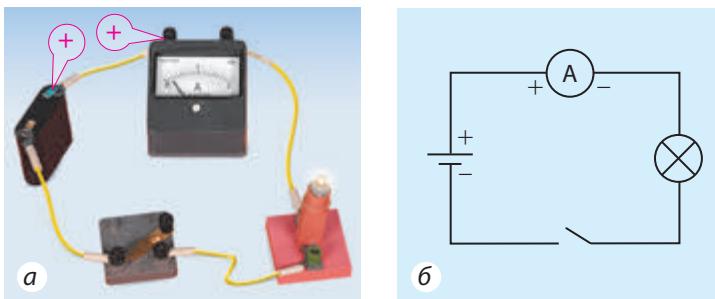
Для вимірювання сили струму використовують прилад, який називається [амперметр](#) ([рис. 27.5](#)).

(A) — умовне позначення амперметра на електрических 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.



**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, яких необхідно дотримуватися під час 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 привести 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  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Дано:**

$$t = 2 \text{ с}$$

$$I = 0,32 \text{ А}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Знайти:**

$$N = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

За означенням сили струму:  $I = \frac{q}{t}$ , тому  $q = It$ . Знайдемо кількість електронів:

$$N = \frac{q}{|e|} = \frac{It}{|e|}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}} = 1;$$

$$N = \frac{0,32 \cdot 2}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4 \cdot 10^{18}.$$

*Відповідь:*  $N = 4 \cdot 10^{18}$  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 з провідником, у якому вимірюють силу струму.



### Контрольні запитання

- Що називають силою струму?
- За якою формулою визначають силу струму?
- Яка одиниця сили струму? На честь кого її названо?
- Яке значення сили струму безпечно для людини?
- Яких основних правил безпеки необхідно дотримуватися під час роботи з електротехнічними пристроями?
- Дайте означення кулона.
- Яким пристроям вимірюють силу струму?
- Які правила необхідно виконувати, вимірюючи силу струму?



### Вправа № 27

- Перенесіть схему електричного кола (рис. 1) до зошита. Покажіть на схемі, де можна приставити амперметр, щоб виміряти силу струму в лампах. Знаками «+» і «-» позначте полярність клем амперметра.
- Сила струму в провіднику 200 мА. Протягом якого часу через поперечний переріз провідника проходить заряд, що дорівнює 24 Кл?
- Накресліть схему електричного кола (рис. 2), позначте на ній полярність клем амперметра. Як, на вашу думку, зміниться показ амперметра, якщо одна з ламп перегорить?
- 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.
- Чому дорівнює сила струму в провіднику, якщо за 10 с через його поперечний переріз проходить  $2 \cdot 10^{20}$  електронів?

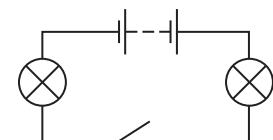


Рис. 1

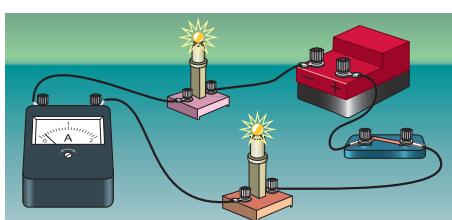


Рис. 2

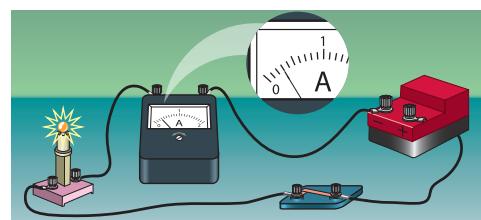


Рис. 3

## § 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 даного параграфа ви дізнаєтесь, 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 певній ділянці кола — це фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщенням однічного 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.

Одницею напруги в СІ є **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 зарядки?

## 2 Проводимо аналогію

Звернувшись до аналогії між електричним струмом і пливом води (див. § 26), можна визначити, що напруга аналогічна різниці рівнів води в посудинах. Якщо рівні води в посудинах однакові, то вода з однієї посудини в іншу не переливатиметься. Аналогічно, якщо на кінцях ділянки 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 кінцях ділянки кола, тим більшу роботу виконає електрична сила під час переміщення 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 — як зовні, так і за принципом дії.

Як і будь-який вимірювальний прилад, вольтметр не має впливати на значення вимірюваної величини. Тому вольтметр сконструйований таким чином, що в разі приєднання його паралельно до певної ділянки електричного кола значення напруги на цій ділянці кола 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, що йде від негативного полюса джерела струму.
3. Для вимірювання напруги на полюсах джерела струму вольтметр приєднують безпосередньо до клем джерела (рис. 28.3).

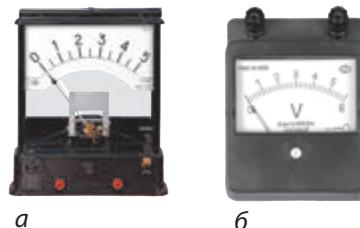


Рис. 28.1. Деякі види вольтметрів: а — шкільний демонстраційний; б — шкільний лабораторний

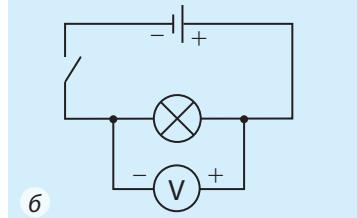
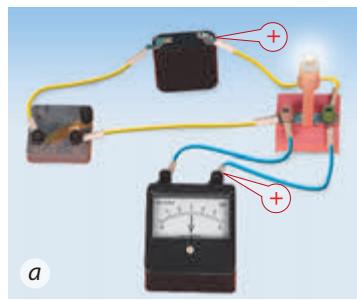


Рис. 28.2. Вимірювання напруги вольтметром на лампі:  
а — загальний вигляд;  
б — схема електричного кола

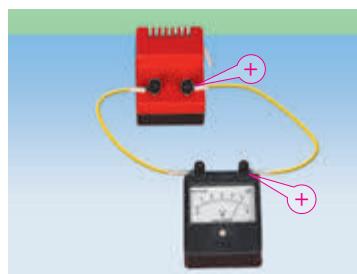


Рис. 28.3. Вимірювання напруги вольтметром на полюсах джерела струму

**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 таку 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:  $A = A_{\text{струму}}$ . Знайшовши вираз для визначення роботи сили тяжіння і роботи струму, обчислимо висоту падіння вантажу.

*Дано:*

$$U = 12 \text{ В}$$

$$m = 36 \text{ кг}$$

$$A = A_{\text{струму}}$$

$$q = 300 \text{ Кл}$$

$$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$$

*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:

$$[h] = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{кг}}} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \text{Кл}}{\frac{\text{Н}}{\text{кг}}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м};$$

$$h = \frac{12 \cdot 300}{36 \cdot 10} = 10 \text{ (м)}.$$

*Відповідь:*  $h = 10 \text{ м}$ .

**Підбиваємо підсумки**

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщенням 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.

Одиницею напруги в СІ є 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 ( $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$ ).

Прилад для вимірювання напруги називають вольтметром. Вольтметр приєднують паралельно тій ділянці кола, напругу на якій необхідно виміряти.



### Контрольні запитання

- Доведіть, що коли в провіднику тече струм, електричне поле виконує роботу.
- Що називають напругою на певній ділянці кола?
- За якою формулою визначають електричну напругу?
- У яких одиницях вимірюють напругу?
- Дайте означення одиниці напруги.
- Який прилад використовують для вимірювання напруги? Яких правил необхідно дотримуватися під час вимірювання напруги?



### Вправа № 28

- На рис. 1 зображені шкали різних вольтметрів. Визначте ціну поділки кожної шкали і напругу на кожному вольтметрі.
- 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.
- Під час переміщення по ділянці кола заряду, що дорівнює 3 Кл, електричне поле виконало роботу 0,12 кДж. Визначте напругу на ділянці кола.
- Електричне поле, переміщуючи ділянкою кола заряд 60 Кл, виконує таку саму роботу, яку виконує сила тяжіння під час падіння тіла масою 200 г з висоти 360 м. Чому дорівнює напруга на ділянці?
- 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.
- Скориставшись додатковими джерелами інформації, складіть задачу на визначення роботи електричного струму в певному електротехнічному пристрої.
- За графіком залежності сили пружності ( $F_{\text{пруж}}$ ) від видовження ( $x$ ) пружини визначте жорсткість ( $k$ ) пружини (рис. 4). Чи залежить жорсткість пружини від сили пружності? від видовження?

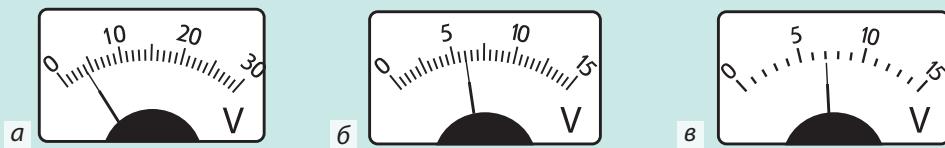


Рис. 1

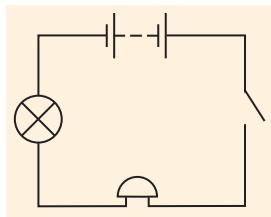


Рис. 2

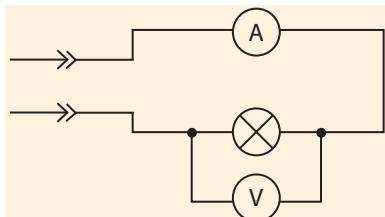


Рис. 3

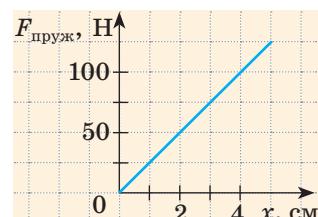


Рис. 4

## § 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.

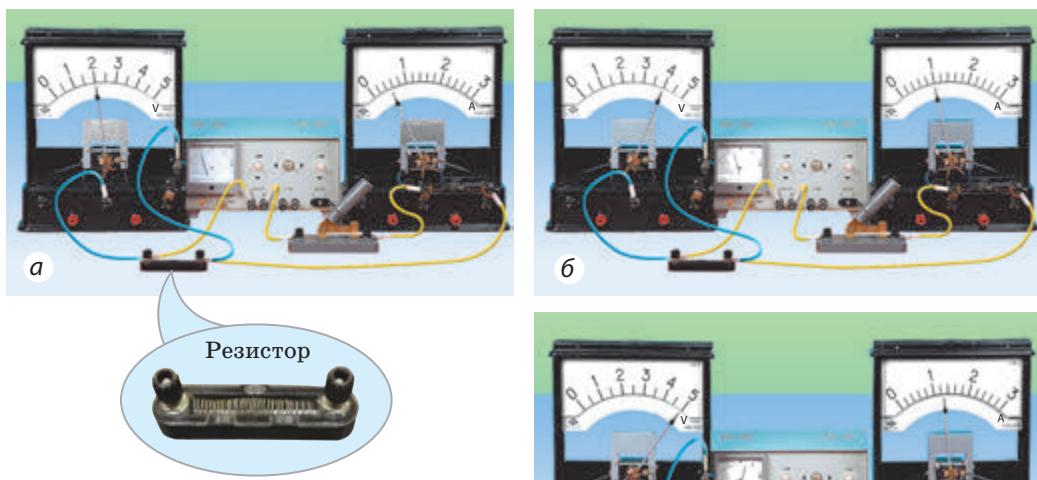
Згадайте, що різниця рівнів води — аналог напруги, а кількість води, що пройшла через трубку за 1 с, — аналог сили струму. Отже, можна припустити, що сила струму на ділянці електричного кола зменшується в разі зменшення напруги і залежить від провідних властивостей провідника. Перевіримо ці припущення.

**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 опору в СІ — ом:*

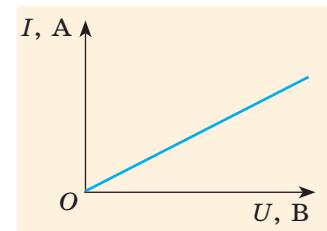
$$[R] = 1 \text{ Ом.}$$

1 Ом — це *опір такого провідника, в якому за напруги на кінцях 1 В сила струму дорівнює 1 А:*

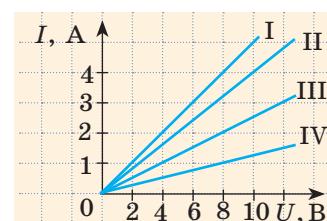
$$1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$



**Рис. 29.2.** Георг Сімон Ом (1787–1854) — німецький фізик, у 1826 р. експериментально відкрив закон, який був згодом названий його ім'ям

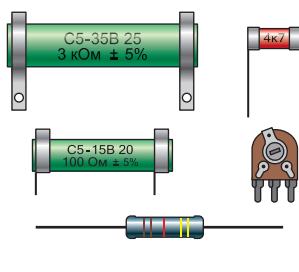


**Рис. 29.3.** Графік залежності сили струму в провіднику від напруги на його кінцях — пряма лінія



**Рис. 29.4.** Залежність сили струму від напруги для різних провідників

\* Величину  $\frac{1}{R}$  у фізиці називають *проводністю*. 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 з опором 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 опори (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.

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 в електротехніці ґрунтуються саме на ньому.



Скориставшись законом Ома, отримайте формулу для розрахунку опору провідника; 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 — це пряма лінія, тому для визначення опору скористаємося координатами будь-якої точки графіка та законом Ома.

**Дано:**

$$I = 10 \text{ А}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

**Знайти:**

$$R = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

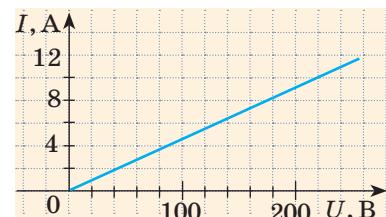
Із графіка бачимо, що, наприклад, за напруги 220 В сила струму в провіднику дорівнює 10 А.

Відповідно до закону Ома  $I = \frac{U}{R}$ , отже,  $R = \frac{U}{I}$ .

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[R] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}; R = \frac{220}{10} = 22 \text{ (Ом)}.$$

**Відповідь:**  $R = 22 \text{ Ом}$ .





### Підбиваємо підсумки

Сила струму  $I$  в ділянці кола прямо пропорційна напрузі  $U$  на кінцях цієї ділянки. Цю закономірність називають законом Ома для ділянки кола та записують формулою  $I = \frac{U}{R}$ , де  $R$  — опір ділянки (залежить тільки від властивостей провідників, що складають ділянку).

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.



### 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 кінцях 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, за 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  $10 \text{ mm}^2$ , виготовлено кільце діаметром 10 см. Визначте масу кільця.

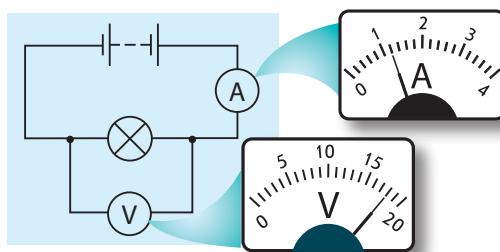


Рис. 1

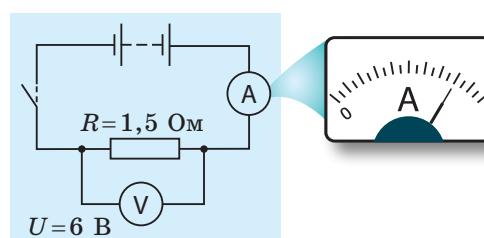


Рис. 2

## § 30. РОЗРАХУНОК ОПОРУ ПРОВІДНИКА. ПИТОМІЙ ОПІР РЕЧОВИНІ. РЕОСТАТИ

Ми так звикли до різноманітних технічних пристройів, що часто не замислюємося, як вони працюють. Наприклад, кожен із вас збільшував гучність звуку радіо чи телевізора або спостерігав за тим, як поступово гасне світло в кінозалі. Але чи ставили ви перед собою запитання: як це вдається? Спробуємо розібратися.

### 1 З'ясовуємо, від чого залежить опір провідника

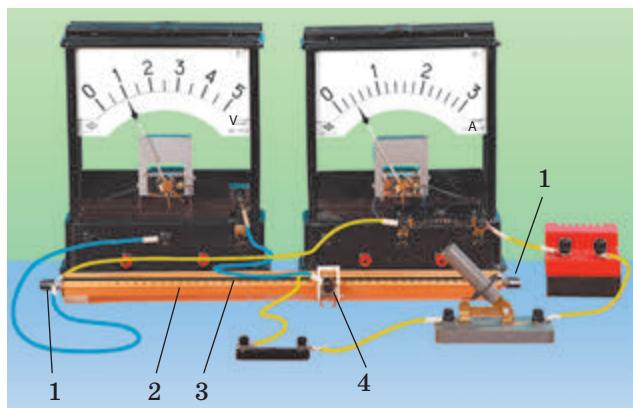
Коли в металевому провіднику йде струм, вільні електрони, рухаючись напрямлено, зіштовхуються з іонами кристалічної ґратки металу — провідник чинить опір електричному струмові.

*Опір провідника залежить від його довжини, площи 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: вимірювши 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. Для вимірювання сили струму та напруги 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 (проводник);
- 4 — повзунок

Щоб з'ясувати, як залежить опір провідника від площині його поперечного перерізу, візьмемо кілька закріплених на панелі ніхромових провідників, однакових за довжиною, але різних за площею поперечного перерізу (рис. 30.2). Дослід показує, що збільшення вдвічі площині поперечного перерізу провідника спричиняє дворазове зменшення його опору, тобто *опір провідника обернено пропорційний площині його поперечного перерізу*.

Провівши досліди з провідниками, однаковими за довжиною і площею поперечного перерізу, але виготовленими з різних речовин (наприклад, міді, алюмінію, ніхому), переконаємося, що *опір провідника залежить від речовини, з якої цей провідник виготовлений*.

Підсумовуючи результати дослідів, можна записати формулу:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де  $R$  — опір провідника;  $l$  — довжина провідника;  $S$  — площа поперечного перерізу провідника;  $\rho$  — коефіцієнт пропорційності, що залежить від речовини, з якої виготовлений провідник. Цей коефіцієнт називають *пітомим опором речовини*.

2

### Даємо означення питомого опору речовини

Звернемося до формулі для обчислення опору провідника:  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Із формулі випливає, що  $\rho = \frac{RS}{l}$ . Якщо  $l = 1\text{ м}$ , а  $S = 1\text{ м}^2$ , то  $\rho$  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  $\text{м}^2$ .

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 площині 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  $1 \text{ mm}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , то

$$1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

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 спрвджаються 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, порцеляну, ебоніт використовують в електротехніці як ізолятори?

### 3 Знайомимося з реостатами

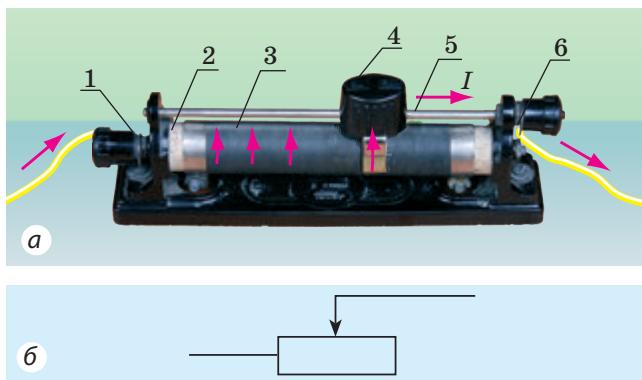
На тому факті, що опір провідника прямо пропорційний його довжині, базується принцип дії *реостатів*.

**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  $I = \frac{U}{R}$ , 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

**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



реостата. Над обмоткою закріпляють металевий стрижень (5), на якому розташовують повзунок (4).

Реостат має дві клеми (два контакти), одна з яких (6) з'єднана зі стрижнем, а друга (1) — з обмоткою. Коли реостат приєднаний до кола, електричний струм проходить від однієї клеми до другої (спочатку у витках обмотки до повзунка, а потім у стрижні).

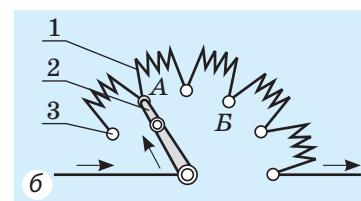
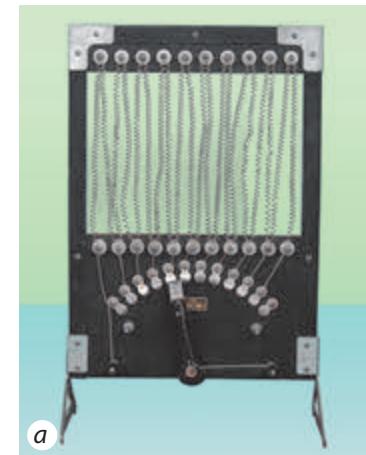
Пересуваючи повзунок уздовж стрижня, плавно збільшують або зменшують довжину  $l$  ділянки обмотки, якою проходить струм. Оскільки  $R = \rho \frac{l}{S}$ , то опір реостата так само плавно збільшується або зменшується, а це приводить до плавної зміни сили струму.

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 вимірювання і вимикання електродвигунів.



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 є найбільша можлива напруга на ньому зазначені в спеціальній таблиці на корпусі пристрою. Обмотки реостатів зазвичай виготовляють із металів (сплавів) з високим питомим опором (константан, мanganін, ніхром, фехраль).



**Рис. 30.4.** Важільний (секційний) реостат:

а — загальний вигляд;

б — схема:

1 — металевий дріт;

2 — важіль;

3 — контакт.

Стрілками показано напрямок струму

4

#### Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Обчисліть силу струму в мідному дроті, який має довжину 10 м і площину поперечного перерізу  $0,5 \text{ mm}^2$ ; 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 формуловою для розрахунку опору провідника; питомий опір міді знайдемо у відповідній таблиці.

**Дано:**

$$l = 10 \text{ м}$$

$$S = 0,5 \text{ мм}^2$$

$$U = 0,034 \text{ В}$$

$$\rho = 0,017 \frac{\Omega \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

**Знайти:**

$$I = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

$$\text{Відповідно до закону Ома: } I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I}.$$

$$\text{Опір дроту визначимо за формулою } R = \frac{\rho l}{S}.$$

Отже, маємо:

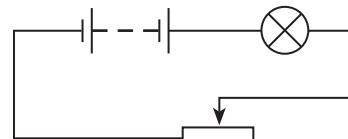
$$\frac{U}{I} = \frac{\rho l}{S} \Rightarrow I = \frac{US}{\rho l}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{\text{В} \cdot \text{мм}^2}{\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}} = \frac{\text{В} \cdot \text{мм}^2}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{А}} = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А} ; I = \frac{0,034 \cdot 0,5}{0,017 \cdot 10} = 0,1 \text{ (А)}.$$

**Відповідь:**  $I = 0,1 \text{ А.}$ 

**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 ( $R_{реост} \uparrow$ ). Відповідно збільшиться і загальний опір ділянки кола ( $R \uparrow$ ).

За законом Ома  $I = \frac{U}{R}$ . 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 площині  $S$  його поперечного перерізу й залежить від речовини, з якої виготовлений провідник:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де  $\rho$  — 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  $\text{м}^2$ .

Для регулювання сили струму в колі застосовують реостати — пристрой, опір яких можна змінювати. На практиці застосовують повзункові, важільні (секційні) та інші реостати.



### Контрольні запитання

1. Доведіть, що провідник чинить опір електричному струму.
2. Як довести, що опір провідника прямо пропорційний його довжині?
3. Чи залежить опір провідника від площини 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 види реостатів ви знаєте? Чим вони відрізняються один від одного? 9. Опишіть будову та принцип дії повзункового реостата. 10. Як позначають повзунковий реостат на схемі?



### Вправа № 30

1. На рис. 1 зображені провідники, що мають однакову площину поперечного перерізу, але виготовлені з різних речовин (заліза, міді, свинцю). Визначте, з якої речовини виготовлений кожний провідник, якщо відомо, що їхні опори однакові.
2. Обчисліть опір мідного дроту завдовжки 2 м, якщо площа його поперечного перерізу становить  $6,8 \text{ mm}^2$ .
3. Як зміняться опір реостата і сила струму в колі (рис. 2), якщо повзунок реостата пересунути праворуч?
4. Яким має бути завдовжки ніхромовий дріт із площею поперечного перерізу  $0,2 \text{ mm}^2$ , щоб за напруги на його кінцях  $4,4 \text{ V}$  сила струму в ньому стала  $0,4 \text{ A}$ ?
5. Дріт, що має опір  $25 \text{ Ohm}$ , розрізали напіл 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 його кінцях становить 7 В. Чому дорівнює маса дроту, якщо сила струму в ньому  $10 \text{ A}$ ?
7. Скориставшись рис. 3, опишіть принцип дії штепсельного реостата.



Рис. 1

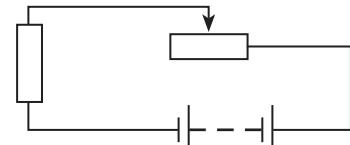


Рис. 2

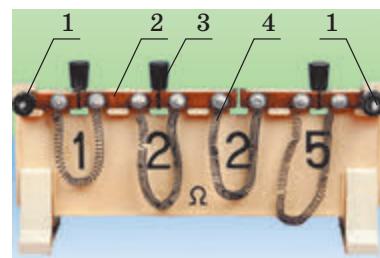


Рис. 3. Штепсельний реостат

(магазин опорів):

1 — затискачі;

2 — мідна пластина;

3 — штепсель; 4 — спіраль



### Експериментальне завдання

Виготовте зі сталевого дроту резистор, що має опір  $0,2 \text{ Ohm}$ . Опишіть свої дії. Не забудьте зазначити діаметр і довжину використаного дроту.



## 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

- Перш ніж виконувати роботу, переконайтесь, що ви знаєте:
  - вимоги безпеки під час роботи з електричними колами;
  - правила, яких необхідно дотримуватися, здійснюючи вимірювання за допомогою амперметра та вольтметра.
- Визначте ціну поділки шкал амперметра та вольтметра.

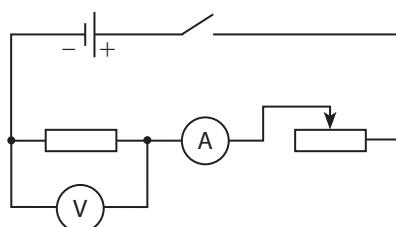


#### Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

- Складіть електричне коло за поданою схемою.



- Розташуйте повзунок реостата на середині обмотки.
- Замкніть коло і виміряйте напругу на кінцях резистора та силу струму в ньому.
- Плавно пересуваючи повзунок реостата, збільшіть силу струму в колі. Запишіть покази вольтметра та амперметра.
- Пересуньте повзунок реостата у протилежний бік і ще двічі виміряйте напругу та силу струму.

## ▶ Опрацювання результатів експерименту

- Обчисліть опір резистора для кожного випадку.
- Результати обчислень занесіть до таблиці.

Номер досліду	Сила струму $I$ , А	Напруга $U$ , В	Опір $R$ , Ом
1			

## ▢ Аналіз експерименту та його результатів

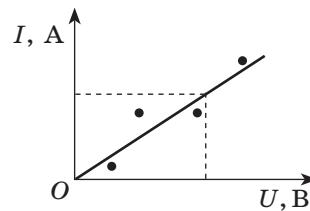
Проаналізувавши експеримент та його результати, зробіть висновок, у якому зазначте:

- яку фізичну величину і за допомогою яких приладів ви навчилися вимірювати;
- чи залежить вимірювана величина від сили струму в резисторі та напруги на його кінцях;
- 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:

- відносну похибку вимірювання сили струму:  $\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I}$ ;
- відносну похибку вимірювання напруги:  $\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U}$ ;
- відносну похибку вимірювання опору:  $\varepsilon_R = \varepsilon_I + \varepsilon_U$ ;
- 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 привести 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 з 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 решта теж не працюватимуть, 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:

$$q = q_1 = q_2,$$

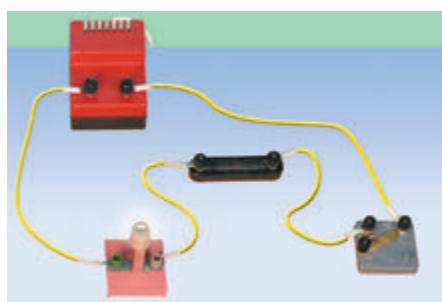
де  $q$  — загальний заряд, який пройшов через коло;  $q_1$  — заряд, який пройшов через поперечний переріз спіралі резистора;  $q_2$  — заряд, який пройшов через поперечний переріз нитки розжарення лампи.

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:

$$I = I_1 = I_2$$



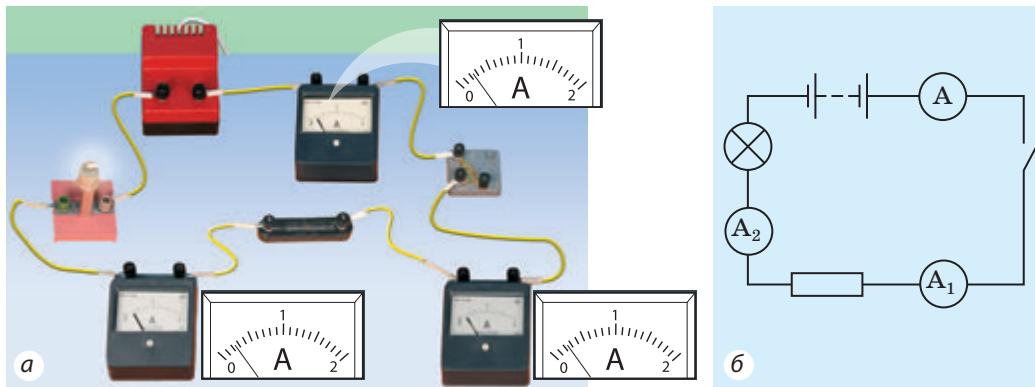
Наші теоретичні дослідження легко перевірити за допомогою експерименту (рис. 31.2).

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:

**Рис. 31.1.** Послідовне з'єднання кількох провідників

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

### § 31. Послідовне з'єднання провідників



**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 однаакова

Якщо електричне поле здійснює роботу  $A_1$  з переміщення заряду  $q$  в першому провіднику і  $A_2$  — у другому, то зрозуміло, що для переміщення заряду через обидва провідники має бути здійснена робота

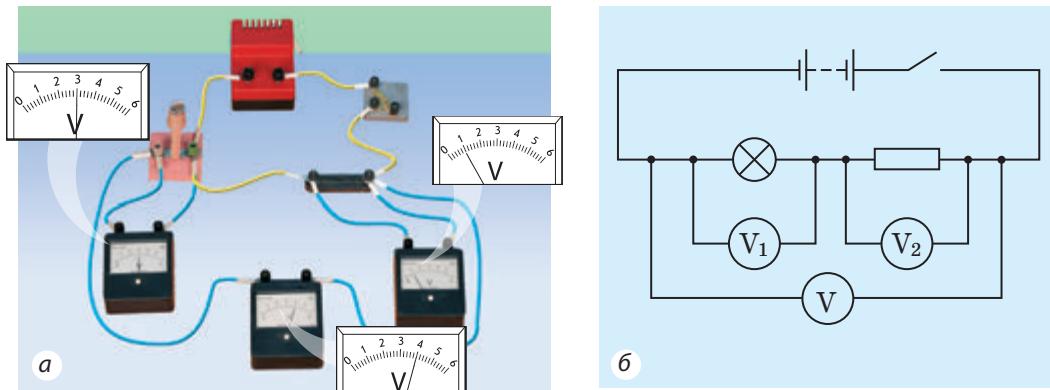
$$A = A_1 + A_2. \text{ Поділивши обидві частини рівності на } q, \text{ отримуємо: } \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q}.$$

За означенням напруги  $\frac{A}{q} = U$ , отже,  $U = U_1 + U_2$ .

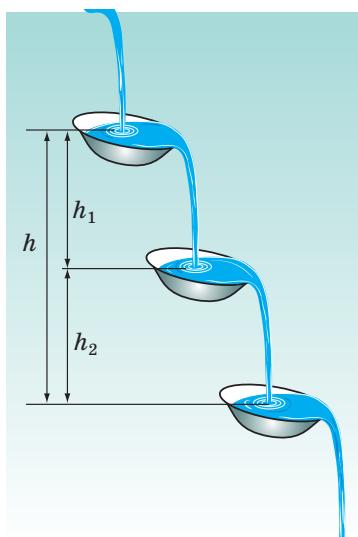
Загальна напруга  $U$  на двох послідовно з'єднаних провідниках дорівнює сумі напруги  $U_1$  на першому провіднику та напруги  $U_2$  на другому провіднику:

$$U = U_1 + U_2$$

Одержаній 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 напруг на окремих пристроях



**Рис. 31.4.** Механічна модель послідовного з'єднання провідників

Отримані співвідношення для сили струму та напруги справджаються для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n;$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n,$$

де  $n$  — кількість провідників.



Щоб краще зрозуміти властивості послідовного з'єднання провідників, скористайтеся механічною аналогією (рис. 31.4); відповідні паралелі проведіть самостійно.



## 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:

$$IR = I_1 R_1 + I_2 R_2.$$

Оскільки в разі послідовного з'єднання  $I_1 = I_2 = I$ , 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:*

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

де  $n$  — кількість провідників.

Проаналізувавши останню формулу, можна зробити такі висновки:

- загальний опір послідовно з'єднаних провідників більший за опір кожного з цих провідників;
- загальний опір послідовно з'єднаних провідників, які мають одинаковий 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 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 знектуйте.

*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 однаакова, обчислимо напругу на кожному резисторі.

**Дано:**

$$R_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 7 \text{ Ом}$$

$$U = 36 \text{ В}$$

**Знайти:**

$$R — ?$$

$$U_1 — ?$$

$$U_2 — ?$$

$$U_3 — ?$$

$$I — ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 2 \text{ Ом} + 3 \text{ Ом} + 7 \text{ Ом} = 12 \text{ Ом}.$$

$$\text{Відповідно до закону Ома: } I = \frac{U}{R} = \frac{36 \text{ В}}{12 \text{ Ом}} = 3 \text{ А.}$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3, \text{ тому } I_1 = 3 \text{ А}; I_2 = 3 \text{ А}; I_3 = 3 \text{ А.}$$

$$U_1 = I_1 R_1 = 3 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 6 \text{ В}; U_2 = I_2 R_2 = 3 \text{ А} \cdot 3 \text{ Ом} = 9 \text{ В};$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 3 \text{ А} \cdot 7 \text{ Ом} = 21 \text{ В.}$$

*Аналіз результатів.* Загальна напруга на ділянці кола  $U = 6 \text{ В} + 9 \text{ В} + 21 \text{ В} = 36 \text{ В}$ . Цей результат збігається зі значенням напруги, поданим в умові задачі, отже, задачу розв'язано правильно.

*Відповідь:*  $R = 12 \text{ Ом}$ ;  $U_1 = 6 \text{ В}$ ;  $U_2 = 9 \text{ В}$ ;  $U_3 = 21 \text{ В}$ ;  $I = 3 \text{ А.}$

**Підбиваємо підсумки**

Електричне коло, що 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 справдіжуються такі співвідношення:

- сила струму в усій ділянці кола та в усіх провідниках однаакова:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ ;

- загальна напруга на всій ділянці кола дорівнює сумі напруг на окремих провідниках:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ ;

- загальний опір ділянки кола є більшим за опір кожного провідника та обчислюється за формулою  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

- загальний опір послідовно з'єднаних провідників, що мають однаковий опір, можна розрахувати за формулою  $R = n \cdot R_0$ , де  $R$  — загальний опір ділянки;  $R_0$  — опір кожного провідника.



### Контрольні запитання

1. Яку особливість має 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?
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 однакових резистори опором 2 Ом кожен. Визначте загальний опір ділянки. Яку напругу подано на ділянку, якщо сила струму в ній становить 0,5 А? Якою є напруга на кожному резисторі?
2. Загальний опір двох ламп і реостата, з'єднаних послідовно, дорівнює 65 Ом. Визначте опір реостата, якщо опір кожної лампи 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 другого резистора, якщо сила струму в ньому 80 мА, а загальна напруга на обох резисторах дорівнює 72 В.
5. Ділянка кола (рис. 2) містить три послідовно з'єднані 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?

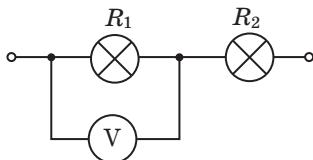


Рис. 1

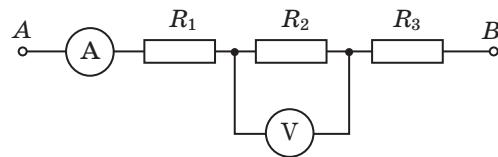


Рис. 2

6. Чи можна лампу для кишенькового ліхтарика, яка розрахована на силу струму 0,3 А, увімкнути в освітлювальну мережу послідовно з лампою, що 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 ( $R_d$ ) — 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 ( $U_d$ ) — на резистор:  $U = U_V + U_d$ .

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 змінювалася енергія кубика в ході падіння? Яку роботу виконала сила тяжіння на кожному етапі падіння? за весь час падіння?

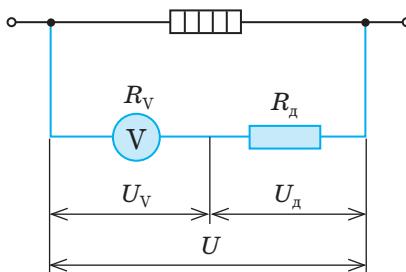


Рис. 3

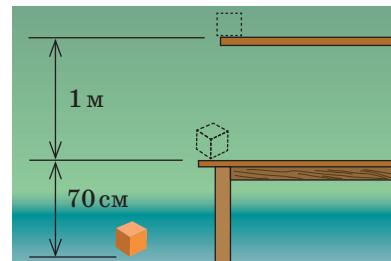


Рис. 4



### Експериментальне завдання

Виготовте пристрій, призначений для перевірки знань (рис. 5). Для цього виконайте такі дії.

- На аркуш цупкого картону наклейте у два стовпчики 10–16 прямокутних смужок із паперу.
- На смужках, розташованих у лівому стовпчику, напишіть запитання.
- На смужках у правому стовпчику напишіть відповіді, причому так, щоб пара «запитання — правильна відповідь» не становила один рядок.
- Поряд із кожним прямокутником вставте в картон кнопку з довгим вістрям.
- За допомогою проводів з'єднайте кнопки на звороті картону так, щоб утворилися пари «запитання — правильна відповідь» (рис. 6), та складіть електричне коло.
- 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.

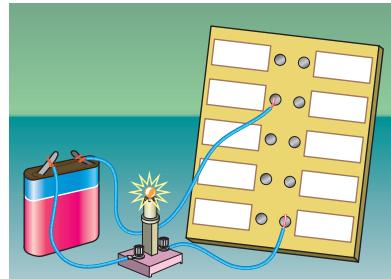


Рис. 5

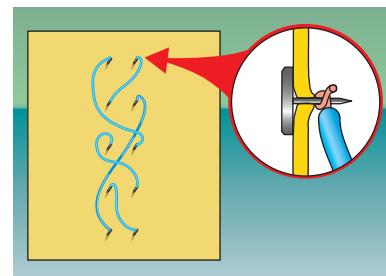


Рис. 6



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4



**Тема.** Дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням провідників.

**Мета:** експериментально перевірити, що в разі послідовного з'єднання двох провідників справджаються 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

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

- Перш ніж виконувати роботу, переконайтесь, що ви знаєте вимоги безпеки під час роботи з електричними колами.
- Накресліть схему електричного кола, що складається з джерела струму, двох резисторів і ключа, з'єднаних послідовно.
- Складіть і запишіть план проведення експерименту. Якщо вагаєтесь, то скористайтеся планом, наведеним нижче.



#### Експеримент

**Дослід 1.** Порівняння сили струму в різних ділянках кола, яке містить послідовне з'єднання провідників.

- Складіть електричне коло за накресленою вами схемою.
- 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.
- 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.

- 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

- Використовуючи результати дослідів 1 і 2, обчисліть опір першого резистора ( $R_1$ ), другого резистора ( $R_2$ ) та опір ділянки кола, яка містить обидва резистори ( $R$ ).
- 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:

- які співвідношення для послідовно з'єднаних провідників ви перевіряли та які результати одержали;
- 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:

- відносну похибку вимірювання напруги на першому резисторі:

$$\varepsilon_{U_1} = \frac{\Delta U}{U_1};$$

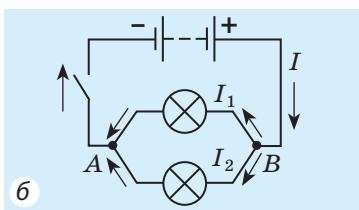
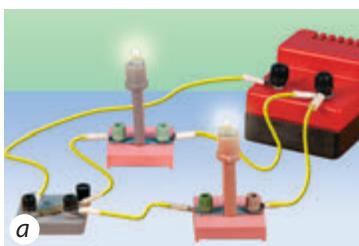
- відносну похибку вимірювання загальної напруги:  $\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U}$ ;

- відносну похибку експерименту:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{U_1 + U_2}{U} \right| \cdot 100\%$ .

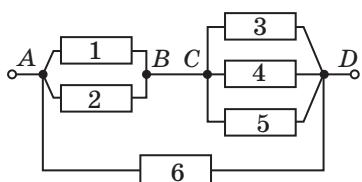


## § 32. ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

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, що складається з паралельно з'єднаних провідників

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 — А і В. 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, що приєднані до будь-якої 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 А і В (рис. 32.3), одразу вимірюємо напругу і на ділянці АВ, і на кожній лампі.

*Загальна напруга на ділянці та напруга на кожному з паралельно з'єднаних провідників є однаковою:*

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$

де  $n$  — кількість провідників.

\* *Вузловою точкою (вузлом)* на електричній схемі кола називають таку точку, в 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 (вузлові 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 же 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:

$$I = I_1 + I_2$$

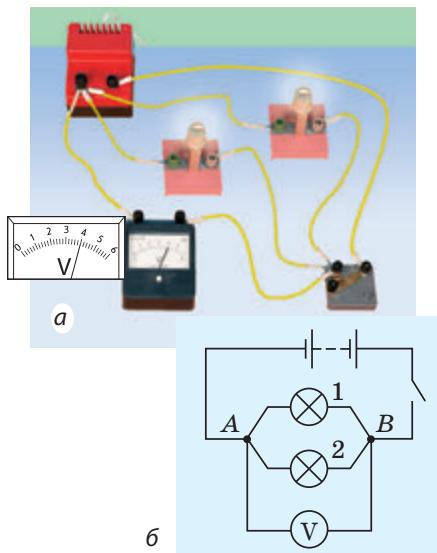
Дане співвідношення справджується для будь-якої кількості паралельно з'єднаних провідників.

*У разі паралельного з'єднання провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках):*

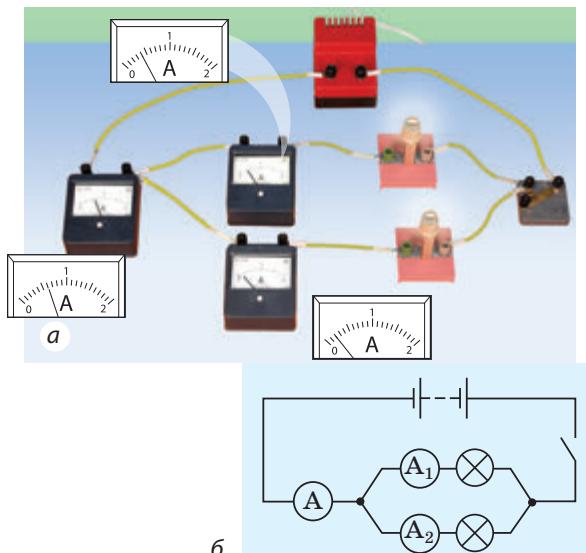
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

де  $n$  — кількість провідників.

Це твердження можна довести експериментально, підключивши в електричне коло, що зображене на рис. 32.1, три амперметри: один ( $A$ ) у нерозгалужену частину кола, а два інші ( $A_1$  та  $A_2$ ) — у кожне відгалуження (рис. 32.4).



**Рис. 32.3.** Вимірювання напруги за умови 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 за умови паралельного з'єднання провідників: сила струму в нерозгалуженій ділянці кола, що вимірюється амперметром  $A$ , дорівнює сумі сил струмів, які вимірюються в кожній вітці розгалуження амперметрами  $A_1$  та  $A_2$

*Зверніть увагу:* якщо одна з паралельно з'єднаних ламп вийде з ладу, то друга продовжить світитися, бо 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  $U = U_1 = U_2$ , 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 з 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:

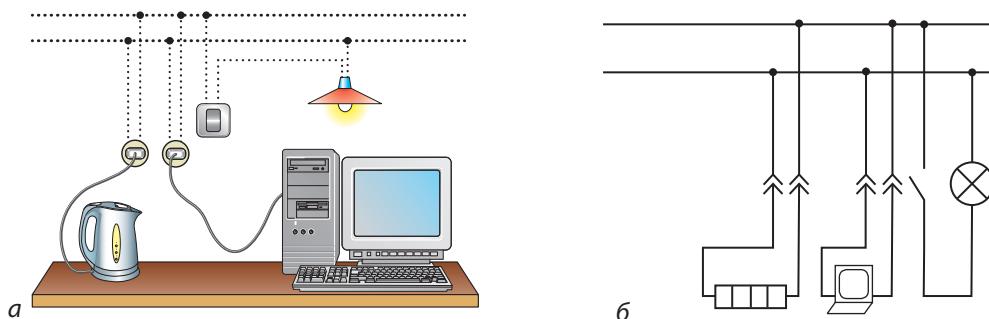
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Проаналізувавши останню формулу, зробимо такі висновки:

- загальний опір провідників, з'єднаних паралельно, менший за опір кожного з цих провідників;
- загальний опір паралельно з'єднаних провідників, які мають одинаковий 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 заховують у стінах

**?** Знайдіть опір ділянки кола, яка містить п'ять провідників опором 15 кОм кожен, 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.

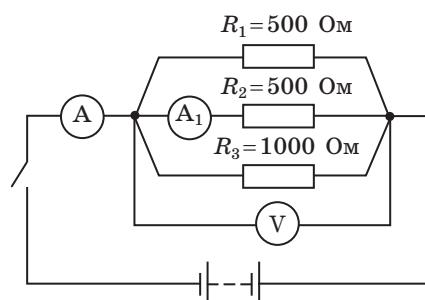
На рис. 32.5 зображено частину електричної проводки у квартирі. Горизонтальні лінії — проводи електромережі. Ці приховані в стінах проводи охоплюють усю квартиру. Напруга між проводами становить 220 В.

#### 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** На рисунку наведено схему електричного кола. Визначте покази амперметрів, якщо показ вольтметра 12 В. Опори резисторів зазначені на рисунку.

*Аналіз фізичної проблеми.* Наведена схема електричного кола має два розгалуження, отже, коло містить паралельне з'єднання провідників.

Амперметр  $A$  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 за умови паралельного з'єднання провідників.



**Дано:**

$$U = 12 \text{ В}$$

$$R_1 = 500 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 500 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}$$

**Знайти:**

$$I — ?$$

$$I_2 — ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

У разі паралельного з'єднання провідників  $U = U_1 = U_2 = U_3$ , тому  $U_1 = 12 \text{ В}$ ;  $U_2 = 12 \text{ В}$ ;  $U_3 = 12 \text{ В}$ .

Відповідно до закону Ома:  $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{12 \text{ В}}{500 \text{ Ом}} = 0,024 \text{ А}$ ;

$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{12 \text{ В}}{500 \text{ Ом}} = 0,024 \text{ А}$ ;  $I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{12 \text{ В}}{1000 \text{ Ом}} = 0,012 \text{ А}$ .

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.** За законом 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:

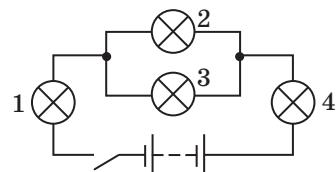
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{500 \text{ Ом}} + \frac{1}{500 \text{ Ом}} + \frac{1}{1000 \text{ Ом}} = \frac{5}{1000 \text{ Ом}}.$$

Звідси  $R = \frac{1000 \text{ Ом}}{5} = 200 \text{ Ом}$ .

Результати збіглися, отже, задачу розв'язано правильно.

**Відповідь:** показ амперметра  $A = 60 \text{ мА}$ ; показ амперметра  $A_1 = 24 \text{ мА}$ .

**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  $30 \text{ В}$ , а опірожної лампи —  $6 \text{ Ом}$ .



**Аналіз фізичної проблеми.** Коло містить змішане з'єднання провідників: лампи 2 і 3 з'єднані паралельно; лампи 1 і 4 з'єднані 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, визначимо значення шуканих величин.

**Дано:**

$$U = 30 \text{ В}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$$

**Знайти:**

$$I_1 — ? \quad I_2 — ?$$

$$I_3 — ? \quad I_4 — ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Лампи 2 і 3 з'єднані паралельно і мають одинаковий опір, тому  $R_{2,3} = \frac{R_2}{2} = \frac{6 \text{ Ом}}{2} = 3 \text{ Ом}$ . 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  $I_1 = 2 \text{ A}$ ;  $I_{2,3} = 2 \text{ A}$ ;  $I_4 = 2 \text{ A}$ .

$$U_{2,3} = I_{2,3} R_{2,3} = 2 \text{ A} \cdot 3 \Omega = 6 \text{ В}. U_2 = U_3 = U_{2,3} \Rightarrow U_2 = 6 \text{ В}; U_3 = 6 \text{ В}.$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{6 \text{ В}}{6 \Omega} = 1 \text{ A}; I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{6 \text{ В}}{6 \Omega} = 1 \text{ A}.$$

**Аналіз результатів.** З одного боку, загальна сила струму на ділянці, що складається з ламп 2 і 3, дорівнює 2 А, з другого боку,  $I_{2,3} = I_2 + I_3 = 1 \text{ A} + 1 \text{ A} = 2 \text{ A}$ . Результати збіглися, отже, задачу розв'язано правильно.

**Відповідь:**  $I_1 = I_4 = 2 \text{ A}$ ;  $I_2 = I_3 = 1 \text{ A}$ .

**Зверніть увагу:** у разі 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.



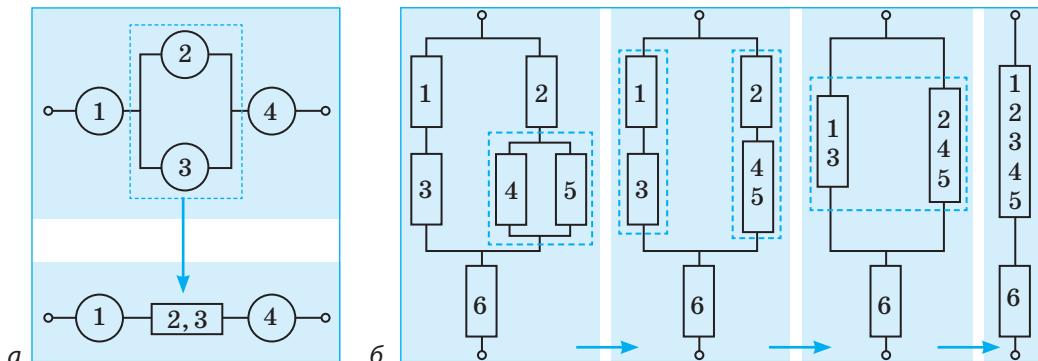
### Підбиваємо підсумки

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 справджаються такі твердження:

- напруга на кожному провіднику і на всій ділянці є однаковою:  $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ ;
- сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях:  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ ;
- загальний опір ділянки кола можна обчислити, скориставшись формулою  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ .



**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 всій ділянці кола, яке містить паралельно з'єднані провідники, 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.
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 другої — 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, зображеного 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 приладу  $A_2$  був нижчим від показу приладу  $A_1$ ? Яке значення сили струму буде показувати прилад  $A_1$ , якщо замкнути ключ  $K_1$ ? Відомо, що прилад  $A_2$  показує 300 мА, якщо всі ключі розімкнені.
8. Ви маєте 4 резистори 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 розрахованій амперметр, можна скористатися тим самим амперметром. Паралельно амперметру слід під'єднати резистор — шунт (рис. 4).

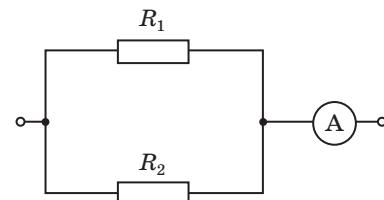


Рис. 1

У разі застосування шунта струм ділиться на дві частини: одна йде через амперметр, а друга — через шунт:  $I = I_A + I_{\text{ш}}$ .

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.

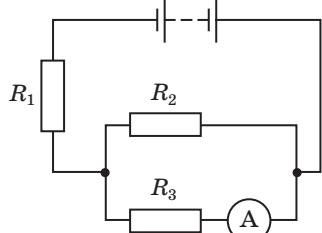


Рис. 2

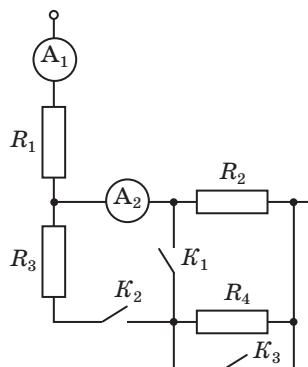


Рис. 3

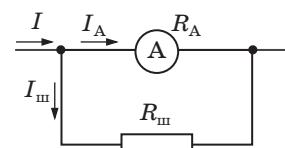


Рис. 4



## 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

- Перш ніж виконувати роботу, переконайтесь, що ви знаєте вимоги безпеки під час роботи з електричними колами.
- Накресліть схему електричного кола, що містить дві паралельно з'єднані лампи, які через ключ з'єднані з джерелом струму.
- 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. Зберіть електричне коло за накресленою вами схемою.
2. Виміряйте силу струму  $I$ , що проходить у нерозгалуженій частині кола, потім силу струму  $I_1$ , який тече в лампі 1, та силу струму  $I_2$ , який тече в лампі 2.
3. Виміряйте напругу  $U$  на лампах.
4. Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

## ▶ Опрацювання результатів експерименту

Використовуючи результати вимірювань, обчисліть опір спіралі лампи 1 ( $R_1$ ) і лампи 2 ( $R_2$ ), а також опір ділянки кола, що містить обидві лампи ( $R$ ). 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:  $\varepsilon_{I_1} = \frac{\Delta I}{I_1}$ ;
- 2) відносну похибку вимірювання загальної сили струму:  $\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I}$ ;
- 3) відносну похибку експерименту:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{I_1 + I_2}{I} \right| \cdot 100\%$ .

## 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*. Щоозначають ці цифри? Очевидно, що це числове значення якоїсь фізичної величини. А якої?

Для початку визначимо одиниці цієї величини. Поряд із цифровим табло написано:  $\text{kVt} \cdot \text{год}$ . Отже, фізична величина, значення якої показує електролічильник, вимірюється в кіловат-годах. Відомо, що  $1 \text{ kVt} = 1000 \text{ Вт}$  і  $1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$ , а  $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ . Таким чином,  $1 \text{ kVt} \cdot \text{год} = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 3600 \text{ с} = 3600000 \text{ Дж}$ , або  $1 \text{ kVt} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ . Одна з фізичних величин, що вимірюються в джоулях, — це робота. Отже, можна припустити, що електролічильником вимірюють *роботу струму*. Щоб переконатися в цьому, приєднаємо до кола електролічильника електрообігрівач. Через деякий час знову знімемо показ лічильника (рис. 33.1, б). Бачимо, що він збільшився.



a



б

**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)

Електричний струм, 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 2016 р. тариф на електроенергію для певної категорії населення в Україні становив 45,6 к. за 1 кВт·год.)

## 2 Обчислюємо роботу струму

З'ясуємо, чи можна роботу струму виміряти в інший спосіб, не використовуючи електролічильник.

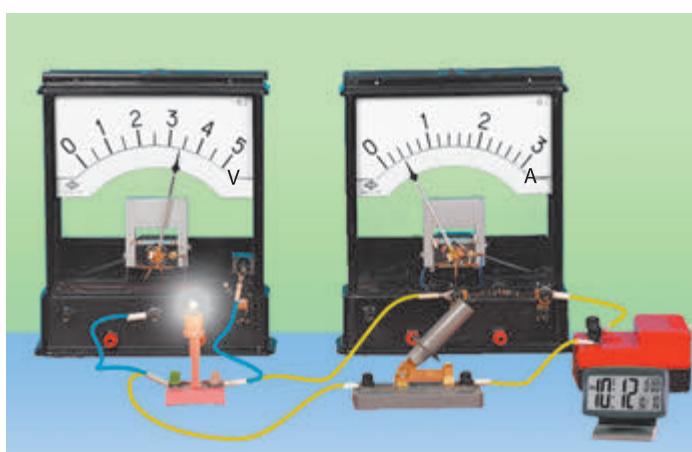
З матеріалу § 28 підручника ви дізналися, що електрична напруга  $U$  на кінцях ділянки електричного кола визначається за формулою  $U = \frac{A}{q}$ . Отже, роботу  $A$  електричного струму з переміщення електричного заряду  $q$  на певній ділянці кола можна знайти за формулою  $A = Uq$ . Подавши заряд  $q$  через силу струму  $I$  та час  $t$  його проходження:  $q = It$ , — отримаємо формулу для розрахунку роботи електричного струму на даний 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 на ньому й 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 формулі 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 електричного струму випливає:  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$ ; 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 та фактичну потужності

Звернувшись до формули розрахунку потужності струму ( $P = UI$ ), побачимо, що потужність струму можна визначити, скориставшись амперметром і вольтметром (перемножити значення напруги та сили струму, визначені за показами цих приладів). 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**.

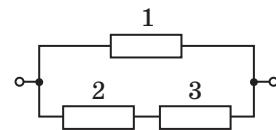
У паспорті електропристрою зазвичай укажують також напругу, на яку пристрій розрахований. Проте напруга в мережі може трохи змінюватися. Наприклад, вона може збільшитися — відповідно збільшиться й сила струму. Збільшення сили струму й напруги приведе до збільшення потужності струму в споживачі. Тобто *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 лічильник, друга — максимальну допустиму силу струму в приладі. Пере-множивши ці значення, одержимо *максимальну 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 резисторів, 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 кожного резистора, а потім загальну потужність усіх резисторів;

2) визначити загальну силу струму в ділянці й, знаючи загальну напругу, обчислити загальну потужність усіх резисторів.

*Дано:*

$$R_1 = R_2 = R_3 =$$

$$= 5 \text{ Ом}$$

$$U = 10 \text{ В}$$

*Знайти:*

$$P — ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

**Спосіб 1**

Ділянка кола, що містить резистори 2 і 3, з'єднана з резистором 1 паралельно, тому  $U_1 = U_{2,3} = U = 10 \text{ В}$ .

$$\text{За законом Ома } I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{10 \text{ В}}{5 \text{ Ом}} = 2 \text{ А.}$$

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 їхні потужності:

$$U_2 = I_2 R_2 = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}, \quad P_2 = U_2 I_2 = 5 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 5 \text{ Вт};$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}, \quad P_3 = U_3 I_3 = 5 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 5 \text{ Вт.}$$

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, що 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, отримали однакове значення потужності, отже, задачу розв'язано правильно.

*Відповідь:*  $P = 30 \text{ Вт.}$

**Задача 2.** Визначте ККД двигуна електровоза, якщо, рухаючись рівномірно зі швидкістю  $16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , він розвиває силу тяги  $300 \text{ кН}$ . Напруга в електромережі  $3 \text{ кВ}$ , сила струму, яку споживає двигун, —  $2 \text{ кА}$ .

*Аналіз фізичної проблеми.* Для розв'язання задачі необхідно з'ясувати, яку частину роботи, виконуваної струмом, що тече в обмотці електродвигуна, становить корисна робота (механічна робота з переміщення електровоза). Використавши формули для розрахунку механічної роботи і роботи струму, знайдемо шукану величину.

*Дано:*

$$v = 16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$F = 3 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$U = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$I = 2 \cdot 10^3 \text{ А}$$

*Знайти:*

$$\eta = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

$$\text{ККД розраховуємо за формулою } \eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}.$$

$A_{\text{кор}} = Fl$  — 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 ( $\text{kВт} \cdot \text{год}$ ):  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

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  $P = UI$ . Одиницею потужності електричного струму в СІ є 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 пристрію. Реальну потужність струму в пристрії називають фактичною потужністю.



### Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу електричного струму? 2. Назвіть відомі вам одиниці роботи електричного струму. 3. Доведіть, що  $1 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ . 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 пристрію? 8. Що таке фактична потужність електричного пристрію?



### Вправа № 33

1. Користуючись показами електролічильника (див. [рисунок](#)), визначте витрачену електроенергію та обчисліть її вартість за тарифом 45,6 к. за 1  $\text{kVt}\cdot\text{год}$ .



2. Доведіть, що  $1 \text{ В}\cdot\text{A}\cdot\text{s} = 1 \text{ Дж}$ .
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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?
7. Дізнайтеся в батьків тариф на електроенергію. 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 $P, \text{ Вт}$	Робота струму $A$		Вартість, грн
		Дж	$\text{kVt}\cdot\text{год}$	



**8.** 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.

A  $A = mgh$

B  $Q = cm\Delta t$

B  $E_k = \frac{mv^2}{2}$

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?

### Фізика і техніка в Україні



**Інститут термоелектрики НАН України і МОН України** (Чернівці) створений у 1990 р. Організатор і незмінний директор інституту — академік 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 для охолодження чутливих сенсорів для систем орієнтації європейських супутників Землі. Розроблено ефективні блоки для побутових холодильників як заміну фреоновим компресорним агрегатам.

Інститут є базою для кафедри термоелектрики Чернівецького національного університету.



## § 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 дізнаєтесь, вивчивши матеріал цього параграфа.

### 1 Розмірюємо 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 (електрони в металах зіштовхуються з іонами, розташованими у вузлах кристалічної ґратки, іони в електролітах — з іншими іонами, атомами або молекулами) і передають їм частину своєї енергії. У результаті середня швидкість хаотичного (теплового) руху частинок речовини збільшується — провідник нагрівається. За законом збереження енергії кінетична енергія, набута вільними зарядженими частинками в результаті дії електричного поля, перетворюється 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 Відкриваємо 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, що 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:

$$Q = I^2 R t$$



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 навколошнім 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:

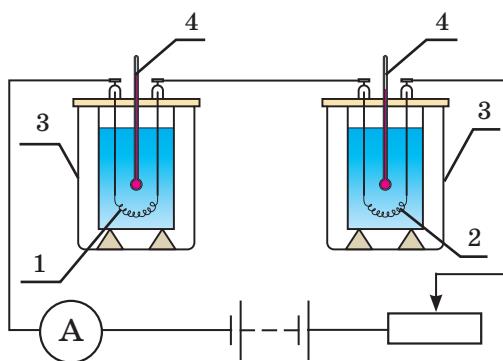
$$Q = UIt = IRIt = I^2Rt.$$

### 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  $Q = \left(\frac{U}{R}\right)^2 R t = \frac{U^2}{R^2} R t$ .



**Рис. 34.1.** Джеймс Прескотт Джоулю (1818–1889) — англійський фізик, один із засновників сучасної теорії теплових явищ. У 1841 р. установив залежність кількості теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом, від сили струму та опору провідника



**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 °C. 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 °C.

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:**

$$\tau = 5 \text{ хв} = 300 \text{ с}$$

$$m = 1,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$$U = 220 \text{ В}$$

$$\eta = 84 \% = 0,84$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^{\circ}\text{C}}$$

**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:

$$\eta = \frac{cm(t_2 - t_1)}{U^2 \cdot \tau}, \text{ або } \eta = \frac{cm(t_2 - t_1) \cdot R}{U^2 \cdot \tau}.$$

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:

$$[R] = \frac{\text{B}^2 \cdot \text{с}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^{\circ}\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot {}^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{B}^2 \cdot \text{с}}{\text{Дж}} = \frac{\text{B}^2 \cdot \text{с}}{\text{B} \cdot \text{A} \cdot \text{с}} = \frac{\text{B}}{\text{A}} = \text{Ом};$$

$$R = \frac{0,84 \cdot 220^2 \cdot 300}{4200 \cdot 1,5 \cdot (100 - 12)} = \frac{84 \cdot 220 \cdot 220 \cdot 3}{420 \cdot 15 \cdot 88} = 22 \text{ (Ом)}.$$

**Відповідь:**  $R = 22 \text{ Ом.}$



## 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 й часу проходження струму:  $Q = I^2 R t$  (закон Джоуля — Ленца).

Існують ще дві формулі для розрахунку кількості теплоти:  $Q = \frac{U^2 t}{R}$  і  $Q = UIt$ , — однак цими формулами можна користуватися тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія йде на нагрівання.



## Контрольні запитання

- Чому нагріваються провідники, в яких тече електричний струм?
- Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
- Як математично записують закон Джоуля — Ленца? **4.** Які формулі для розрахунку кількості теплоти, що виділяється в провіднику внаслідок проходження струму, ви знаєте? Чи завжди можна ними користуватися?



## Вправа № 34

- Скільки теплоти виділиться за 10 хв в електропечі, увімкнuttй у мережу, якщо опір нагрівального елемента печі становить 30 Ом, а сила струму в ньому дорівнює 4 А?
- 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?
- Чому електричні проводи, якими подається напруга до електричної лампи розжарення, не нагріваються, а нитка розжарення лампи нагрівається та яскраво світиться?
- Електрокип'ятильник за 5 хв нагріває 0,2 кг води від 14 °C до кипіння за умови, що в його обмотці тече струм силою 2 А. Визначте напругу, подану на електрокип'ятильник. Втратами енергії знехтуйте.
- У кожний із двох калориметрів налили 200 г води за температури 20 °C. 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.
- 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.
- Порівняйте кількості теплоти, які необхідно витратити, щоб розплавити мідний і свинцевий дроти, якщо ці дроти мають однакову масу й узяті за температури 27 °C.



## § 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 уберегтися від загоряння проводів, якщо замикання все ж таки відбулося, ви дізнаєтесь з 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 пристрій 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, що мають високу температуру плавлення* (рис. 35.3). Щоб уникнути ураження струмом, нагрівальний елемент *ізоляють 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.

## 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 увімкнути відразу кілька потужних споживачів, загальний опір кола суттєво зменшиться, відповідно сила струму в колі значно збільшиться.

Різко збільшується сила струму в колі у випадку короткого замикання — з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором даної ділянки. Так, коротке замикання може виникнути у випадку порушення ізоляції проводів або під час ремонту елементів електричного кола, які перевивають 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 небезпечної збільшення сили струму, використовують запобіжники — пристрой, які розмикають коло, якщо сила струму в ньому збільшиться понад норму (рис. 35.5, 35.6).



**Рис. 35.3.** Нагрівальний елемент електричної лампи розжарення виготовляють із вольфраму, температура плавлення якого 3387 °C. Нагріваючись до температури 3000 °C, тонка вольфрамова нитка починає яскраво світитися



**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 розмиктається. Після охолодження запобіжник знову можна повернути в робочий стан

**Рис. 35.6.** Плавкі запобіжники, які застосовують в радіотехніці. Уздовж осі скляної 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 потужністю 200 Вт, пральну машину потужністю 800 Вт, електричний чайник потужністю 1400 Вт?

**Аналіз фізичної проблеми.** Для розв'язання задачі слід визначити загальну потужність  $P_{\text{зар}}$  увімкнених споживачів. Якщо  $P_{\text{зар}}$  споживачів менша від максимально можливої потужності струму  $P_{\text{max}}$ , на яку розрахований запобіжник, то запобіжник не спрацює, якщо більша — він розімкне коло. Максимально можливу потужність струму  $P_{\text{max}}$  визначимо, знаючи напругу в мережі (220 В) і силу струму, на яку розрахований запобіжник.

**Дано:**

$$I = 10 \text{ А}$$

$$P_1 = 200 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 800 \text{ Вт}$$

$$P_3 = 1400 \text{ Вт}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

**Знайти:**

$$P_{\text{max}} = ?$$

$$P_{\text{зар}} = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

За будь-якого з'єднання споживачів їхня загальна потужність дорівнює сумі потужностей окремих споживачів:

$$P_{\text{зар}} = P_1 + P_2 + P_3.$$

Відповідно до формули для розрахунку потужності:

$$P_{\text{max}} = UI_{\text{max}}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканих величин:

$$[P] = \text{В} \cdot \text{А} = \text{Вт}; P_{\text{max}} = 220 \cdot 10 = 2200 \text{ (Вт)};$$

$$P_{\text{зар}} = 200 + 800 + 1400 = 2400 \text{ (Вт)}.$$

*Аналіз результату.* Порівнявши загальну потужність увімкнених споживачів ( $P_{\text{заг}} = 2400 \text{ Вт}$ ) і потужність, на яку розрахований запобіжник ( $P_{\text{max}} = 2200 \text{ Вт}$ ), бачимо, що навантаження в колі перевищило максимальне можливе значення. Отже, запобіжник спрацює і коло розімкнеться.

*Відповідь:* запобіжник розімкне коло.



### Підбиваємо підсумки

Робота різноманітних електронагрівальних пристрій ґрунтуються на тепловій дії струму.

Під час роботи електронагрівальних пристрій 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, 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 пристрія? 4. Що може стати причиною надмірного збільшення сили струму в електричному колі? До чого це може привести? 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 пристрії, 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 пристріями, які ввімкнено в мережу?
3. Яким вимогам має відповідати речовина, з якої виготовляють дріт для плавкого запобіжника?
4. Для приєднання зварювального апарату, який споживає струм силою 100 А, молодий робітник вирішивскористатися освітлювальним шнуром. Чому ви, знаючи фізику, ніколи цього не зробите?
5. Праска — один із найпоширеніших нагрівальних пристрій, здавна використовуваних людиною. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтесь про історію створення праски та підгответте коротке повідомлення.



### 6. Які з поданих тверджень є істинними?

- Атом складається з ядра та розташованих навколо нього електронів.
- Розмір ядра атома майже в 10 разів менший, ніж розмір атома.
- У нейтральному атомі кількість електронів дорівнює кількості протонів.
- 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 увімкнути в одне відгалуження проводки.

### Фізика і техніка в Україні



**Історія Львівського національного університету ім. І. 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 найпрестижніших освітніх закладів України, здобув високий міжнародний авторитет, став потужним науковим осередком. Спочатку університет мав два факультети — філософський і богословський (теологічний). Сьогодні в університеті 19 факультетів, серед яких особливою популярністю користуються 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'язано широке застосування електричної енергії в житті людини.

**1****З'ясовуємо природу електричного струму в металах**

Ви знаєте, що валентні електрони в металах легко залишають «свій» атом і стають вільними. У результаті у вузлах кристалічної гратки металу залишаються позитивні йони.

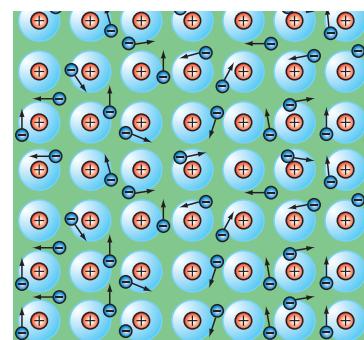
За відсутності електричного поля вільні електрони всередині металевого провідника рухаються хаотично. Рух електронів у металах нагадує рух молекул газу, саме тому вільні електрони в металах називають *електронним газом* (рис. 36.1). Якщо ж у провіднику створено електричне поле, то електрони, не припиняючи хаотичного руху, починають зміщуватись у бік позитивного полюса джерела струму. Рух електронів стає напрямленим — у металі утворюється електричний струм.

**Електричний струм у металах** являє собою напрямлений рух вільних електронів.

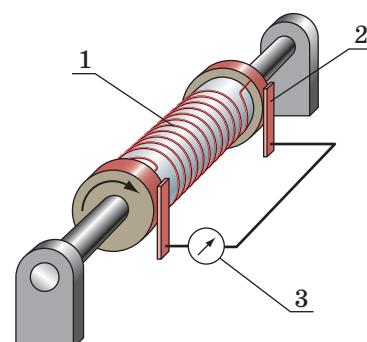
Природа струму в металах була експериментально встановлена відомими вченими Леонідом Ісааковичем Мандельштамом і Миколою Дмитровичем Папалексі (1913 р.) під час роботи в Страсбурзькому університеті; методику дослідів удосконалили американські фізики Річард Толмен і Томас Стюарт (1916 р.).

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 незакріплених предметів). У результаті в провіднику виникне коротчачасний струм — його зафіксує гальванометр; за напрямком відхилення стрілки гальванометра можна з'ясувати знак заряду частинок, рух яких спричинив появу струму. (Які саме частинки створюють струм, встановлюють за відношенням заряду частинок до їхньої маси.)

**?** За рис. 36.2 визначте напрямок руху електронів після зупинки котушкі і напрямок коротчачасного електричного струму, який при цьому виникає.



**Рис. 36.1.** Вільні електрони в металах за відсутності електричного поля рухаються хаотично



**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

## 2 Переконуємося, що опір металів залежить від температури

Проведемо дослід. З'єднаємо сталеву спіраль із джерелом струму й підігріватимемо її в полум'ї спиртівки (рис. 36.3). 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 речовин, 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*. Датчик — найчастіше платиновий дріт — розміщують у середовищі, температуру якого необхідно виміряти. Опір дроту вимірюється спеціальним приладом, і за відомим опором визначають температуру середовища. На практиці шкалу приладу відразу градують в одиницях температури.

## 3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений Г. Камерлінг-ОНнес (рис. 36.4), досліджуючи, як поводиться ртуть за температур, близьких до абсолютноного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), помітив дивне явище: в разі зниження температури ртути до  $4,15\text{ K}$  ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) 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 провідності металів. У 1957 р. група американських учених (рис. 36.5) і незалежно від них радянський учений М. М. Богослов (рис. 36.6) розробили квантову теорію надпровідності.



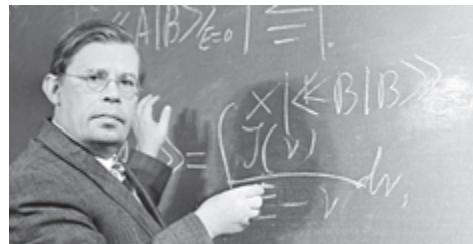
**Рис. 36.3.** Дослід, що демонструє залежність опору металів від температури. У процесі нагрівання спіралі сила струму в ній зменшується, отже, опір спіралі зростає



**Рис. 36.4.** Гейке Камерлінг-ОНнес (1853–1926) — нідерландський фізик, лауреат Нобелівської премії (1913 р.). Відкрив явище надпровідності металів



**Рис. 36.5.** Джон Бардін (1908–1991), Леон Купер (народ. 1930 р.), Джон Роберт Шріффер (народ. 1931 р.) — 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 абсолютноного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.



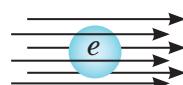
### Контрольні запитання

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 міститься в електричному полі, силові лінії якого зображені на рисунку. Як направлена 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 саме в той момент, коли лампу вмикають.



- 4.** У металевому провіднику завдовжки 10 см і з площею поперечного перерізу  $0,4 \text{ см}^2$  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 так званому 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 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 натрій хлориду — кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ) складаються з позитивних іонів Натрію ( $\text{Na}^+$ ) і негативних іонів Хлору ( $\text{Cl}^-$ ) (рис. 37.1), кристали купруму(ІІ) сульфату ( $\text{CuSO}_4$ ) — з позитивних іонів Купруму ( $\text{Cu}^{2+}$ ) і негативних іонів сульфату ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Якщо такі речовини розчинити у воді, вони можуть розпастися на окремі іони.

Розглянемо процес розпаду речовин на іони на прикладі розпаду кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ) у воді ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Як ви вже знаєте з курсу хімії, молекули води є *полярними*: атоми Гідрогену й атом Оксигену в молекулі води розташовані несиметрично, тому з одного боку молекули домінують позитивний заряд, а з другого боку — такий самий негативний (рис. 37.2, а). Отже, молекулу води можна уявити як *електричний диполь*\* (рис. 37.2, б).

Коли кристалик солі потрапляє у воду, диполі води оточують іони Натрію та іони Хлору, орієнтуючись певним чином (рис. 37.3, а). Деякі диполі води потрапляють у проміжки між іонами та значно послаблюють силу їх притягання. Унаслідок цього процесу і внаслідок теплового руху молекул води іони відокремлюються від кристалика (рис. 37.3, б).

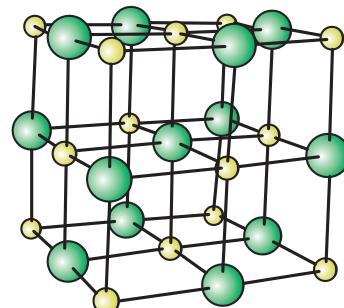
Розпад речовин на іони внаслідок дії полярних молекул розчинника називають **електролітичною дисоціацією** (від латин. *dissociatio* — роз'єднання, розділення).

У результаті електролітичної дисоціації в розчині з'являються вільні заряджені частинки — позитивні і негативні іони, тому розчин починає проводити струм.

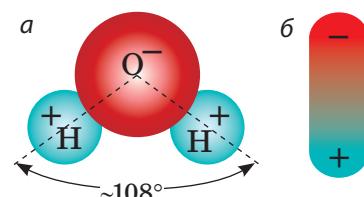
Досліди показують, що розпад речовин на іони може бути спричинений не тільки розчинником. Деякі солі та оксиди металів можуть розпадатися на іони внаслідок значного збільшення температури. Тому розплали цих речовин теж проводять електричний струм. Розчини й розплави, які проводять електричний струм, відносять до **електролітів**.

## 2 Досліджуємо природу електричного струму в електролітах

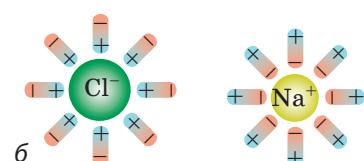
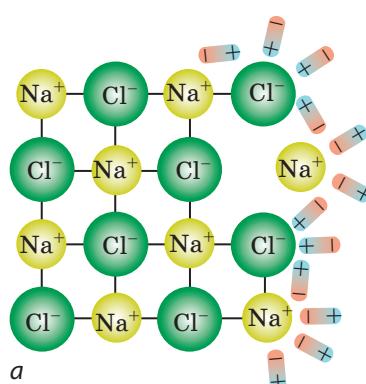
Візьмемо два вугільні електроди та з'єднаємо їх із полюсами джерела струму (див. рис. 37.4). Електрод, з'єднаний із позитивним



**Рис. 37.1.** Модель кристалічної гратки кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ): позитивні іони Натрію ( $\text{Na}^+$ ) — жовті кульки; негативні іони Хлору ( $\text{Cl}^-$ ) — зелені кульки

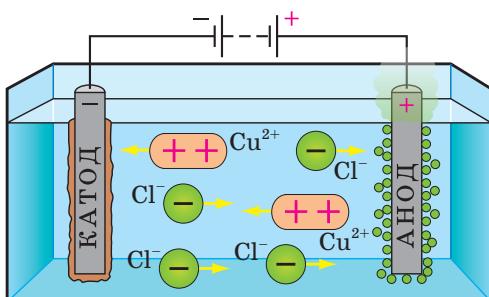


**Рис. 37.2.** Схематичне зображення молекули води



**Рис. 37.3.** Механізм електролітичної дисоціації кухонної солі

\* Електричний диполь — сукупність двох однакових за значенням різновимінних зарядів, які розташовані на певній відстані один від одного.



**Рис. 37.4.** Схема дослідження електричного струму в рідинах. У ванну з розчином електроліту ( $\text{CuCl}_2$ ) занурені катод і анод. Після замикання кола позитивні іони (катіони) рухаються до катода, негативні іони (аніони) — до анода

плюсом джерела струму, називають **анодом**, а електрод, з'єднаний із негативним полюсом, — **катодом**. Опустимо електроди в посудину з електролітом, наприклад, із водним розчином купруму(ІІ) хлориду ( $\text{CuCl}_2$ ), і замкнемо коло. У розчині виникне електричне поле, через дію якого вільні позитивні іони Купруму ( $\text{Cu}^{2+}$ ) попрямують до катода, а вільні негативні іони Хлору ( $\text{Cl}^-$ ) — до анода (рис. 37.4). Отже, в розчині виникне напрямлений рух вільних заряджених частиник — електричний струм.

**Електричний струм в електролітах** являє собою напрямлений рух позитивних і негативних іонів.

Під час проходження струму через електроліт позитивні іони рухаються до негативного електрода — катода, тому їх називають *катіонами*; негативні іони рухаються до позитивного електрода — анода, і їх відповідно називають *аніонами*.

Іонний механізм провідності мають не тільки деякі розчини та розплави, але й деякі тверді речовини, наприклад натрій хлорид ( $\text{NaCl}$ ), калій хлорид ( $\text{KCl}$ ), аргентум(І) нітрат ( $\text{AgNO}_3$ ) та ін.

**Електроліти** — це тверді або рідкі речовини, які мають іонну провідність.

Зазначимо, що зі збільшенням температури кількість іонів у електроліті збільшується, відповідно збільшується й сила струму. Це означає, що *зі збільшенням температури опір електроліту зменшується*.

### 3

### Даємо означення електролізу

Проходження електричного струму через електроліт (на відміну від проходження струму через метал) характеризується тим, що 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 купруму(ІІ) хлориду протягом кількох хвилин пропускати струм, то поверхню катода вкрис тонкий шар міді (рис. 37.5), а біля анода виділиться газоподібний хлор. Наявність хлору можна виявити за характерним запахом.

Пояснимо, чому так відбувається. Під час проходження струму вільні позитивні іони Купруму ( $\text{Cu}^{2+}$ ) прямають до катода, а вільні негативні іони Хлору ( $\text{Cl}^-$ ) — до анода (див. рис. 37.4). Досягши катода, катіони Купруму «беруть» з його поверхні електрони, яких ім «брakuє»,

тобто відбувається *хімічна реакція відновлення*. Унаслідок цієї реакції катіони Купруму перетворюються на нейтральні атоми; на поверхні катода осідає мідь. Водночас аніони Хлору, досягши поверхні анода, навпаки, «віддають» йому «надлишкові» електрони — відбувається *хімічна реакція окиснення*; на аноді виділяється хлор.



Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, які відбуваються на електродах під час проходження струму, називають **електролізом**.

#### 4

#### Відкриваємо закон Фарадея

Уперше явище електролізу докладно вивчив англійський фізик *M. Фарадей* (рис. 37.6). Він сформулював закон, який згодом був названий **законом електролізу**, або **першим законом Фарадея**:

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:  $1 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}} = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$ .

**Рис. 37.5.** Через кілька хвилин після початку пропускання струму через розчин купруму(II) хлориду поверхню катода вкриє тонкий шар міді



**Рис. 37.6.** Майкл Фарадей (1791–1867) — англійський фізик, засновник учнення про електромагнітне поле. Виявив хімічну дію електричного струму, установив закони електролізу і здійснив чимало інших видатних відкриттів

Так, електрохімічний еквівалент срібла  $(\text{Ag}^+)$  дорівнює  $1,12 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$ , а електрохімічний еквівалент алюмінію  $(\text{Al}^{3+}) = 0,09 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$ .

*Зверніть увагу:* перший закон електролізу можна записати також у 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.** Для визначення електрохімічного еквіваленту міді через розчин купрум(II) сульфату протягом 30 хв пропускали струм силою 0,5 А. Яке значення електрохімічного еквіваленту 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, що виділилася на катоді, знайдемо як різницю мас катода після досліду й до нього. Оскільки в таблицях електрохімічний еквівалент подають у міліграмах на кулон, то масу зручно подати в міліграмах.

**Дано:**

$$t = 1800 \text{ с}$$

$$I = 0,5 \text{ А}$$

$$m_1 = 75\,200 \text{ мг}$$

$$m_2 = 75\,470 \text{ мг}$$

**Знайти:**

$$k = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

Відповідно до першого закону Фарадея маємо:  $m = kIt$ , отже,  $k = \frac{m}{It}$ ; при цьому  $m = m_2 - m_1$ . Одержано:

$$k = \frac{m_2 - m_1}{It}.$$

Перевіримо одиницю, визначимо значення шуканої величини:

$$[k] = \frac{\text{мг}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}; k = \frac{75\,470 - 75\,200}{0,5 \cdot 1800} = \frac{270}{900} = 0,30 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}.$$

*Аналіз результату.* Порівнявши отримане значення електрохімічного еквіваленту міді з табличним  $\left(k = 0,33 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}\right)$ , бачимо, що результати практично збіглися. Похибка виникла 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 іонний характер провідності. Розпад електролітів на іони 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 еквіваленту?

### Вправа № 37



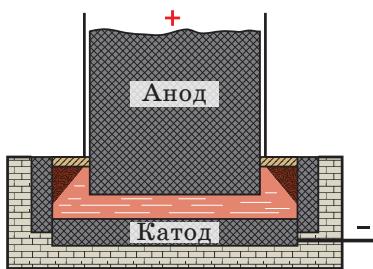
1. Скориставшись законом електролізу, виведіть одиницю електрохімічного еквіваленту в СІ.
2. Дистильована вода не є провідником. А чому водопровідна, річкова та морська вода проводить електричний струм?
3. Чому розчин солі у воді добре проводить електричний струм, а розчин цукру у воді — погано?
4. Під час електролізу, де електролітом був розчин аргентум(І) нітрату, на катоді виділилося 25 г срібла. Скільки часу тривав електроліз, якщо сила струму була незмінною й дорівнювала 0,5 А?
5. Через розчин аргентум(І) нітрату 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 дізнайтесь 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  $40 \text{ см}^2$ .





## § 38. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Існує легенда, що наприкінці XVIII ст. король Англії надіслав у подарунок російській імператриці Єкатерині II... 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 пристроя). Дно та стінки ванни слугують катодом; алюміній збирається на дні ванни. Вугільній 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 алюміній оксид ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), розчинений у розплавленому кріоліті ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) за температури  $950^\circ\text{C}$ . 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 Одержано 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.

Способ 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 купрум(II) сульфату ( $\text{CuSO}_4$ ) занурюють два електроди. Анодом слугує товста пластинка неочищеної міді, а катодом — тонка пластинка чистої міді (рис. 38.2).

У розчині купрум(II) сульфат розкладається на катіони Купруму ( $\text{Cu}^{2+}$ ) та сульфат-аніони ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Сульфат-аніони рухаються до анода та поступово розчиняють його. А катіони Купруму прямують до катода й осідають на ньому. У результаті чиста мідь переноситься з анода на катод, 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**.

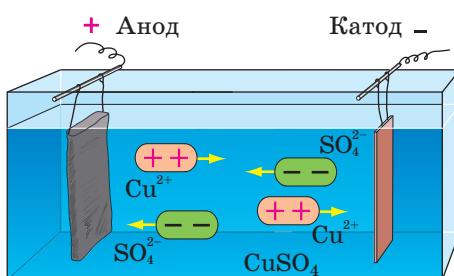
Виріб, який бажають покрити шаром певного металу, занурюють у ванну з розчином електроліту, до складу якого входить цей метал. Виріб слугує катодом, а пластинка металу, яким покривають виріб, — анодом. Під час пропускання струму метал осідає на виробі (катоді), а анодна пластинка поступово розчиняється (рис. 38.3).

### 4 Вивчаємо гальванопластику

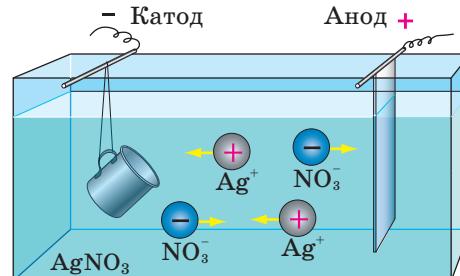
**Гальванопластика** — це отримання за допомогою електролізу точних копій рельєфних виробів.

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).

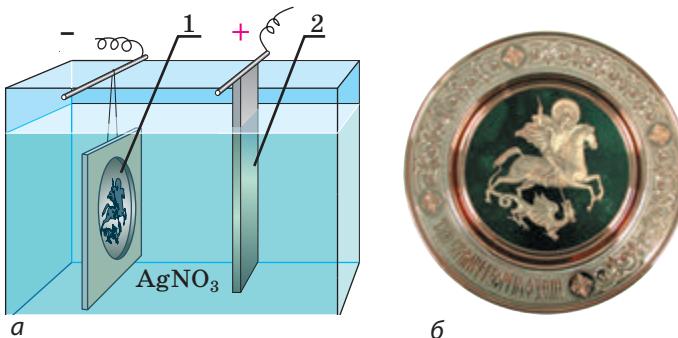
Зрозуміло, що застосування електролізу в сучасній техніці не обмежене розглянутими прикладами. За допомогою електролізу можна здійснити полірування поверхні анода; електроліз лежить в основі зарядженння та розрядження кислотних і лужних акумуляторів тощо.



**Рис. 38.2.** Рафінування міді: тонка пластинка чистої міді є катодом, товста пластинка неочищеної міді — анодом; ванна наповнена водним розчином купруму (ІІ) сульфату



**Рис. 38.3.** Гальванічне сріблення. Предмет, який покривають сріблом (кухоль), є катодом, срібна пластинка — анодом; ванна наповнена розчином аргентуму (І) нітрату



**Рис. 38.4.** Отримання рельєфних копій за допомогою електролізу: а — схема пристрою: восковий зліпок, покритий тонким шаром графіту, є катодом (1), срібна пластина — анодом (2); ванна наповнена розчином аргентуму (І) нітрату; б — одержана копія

## 5

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Під час нікелювання на кожний  $1 \text{ дм}^2$  поверхні виробу, який нікелюють, подають силу струму  $0,4 \text{ А}$ . За який час на виріб буде нанесено шар нікелю завтовшки  $0,02 \text{ мм}$ ?

**Аналіз фізичної проблеми.** Час перебігу електролізу можна визначити за допомогою першого закону 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, товщину шару — в сантиметрах, площа 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:

$$[t] = \frac{\frac{\text{г}}{\text{см}^3 \cdot \text{см}^2 \cdot \text{см}}}{\frac{\text{г}}{\text{Кл}} \cdot \text{А}} = \frac{\text{г} \cdot \text{Кл}}{\text{г} \cdot \text{А}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{с}; t = \frac{8,9 \cdot 100 \cdot 0,002}{0,0003 \cdot 0,4} \approx 14\,800 \text{ (с)};$$

$$t = 14\,800 \text{ с} \approx 4 \text{ год } 7 \text{ хв.}$$

**Відповідь:**  $t \approx 4 \text{ год } 7 \text{ хв.}$



### Підбиваємо підсумки

Електроліз широко застосовують у промисловості. За допомогою електролізу із солей і оксидів одержують багато металів (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 цього 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 2,52 г?  
6) Яку енергію буде витрачено під час сріблениня, якщо напруга на електродах становить 11 В?
2. На рис. 2 наведено схематичне зображення електричного кола, до складу якого входить посудина з водним розчином цинк(ІІ) сульфату. За даними рисунка обчисліть товщину шару цинку, що утвориться на катоді в результаті електролізу.
3. Для сріблення ложок через розчин аргентум(І) нітрату пропускали струм силою 1,8 А. Катодом слугували 12 ложок, кожна з яких мала площа поверхні 50 см<sup>2</sup>. Скільки часу тривав електроліз, якщо на ложках утворився шар срібла завтовшки 58 мкм?

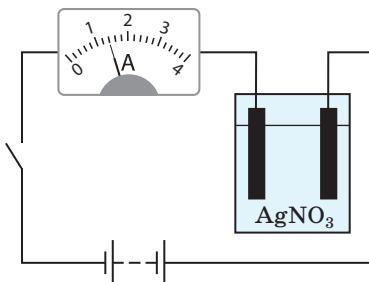


Рис. 1

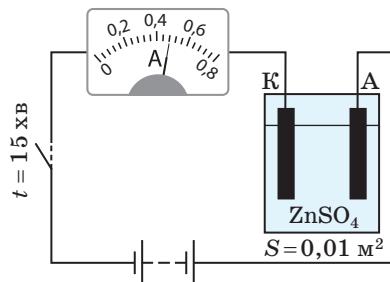


Рис. 2

4. Під час рафінування міді анодом слугує пластина неочищеної міді масою 2 кг, що містить 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 вибрали, 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

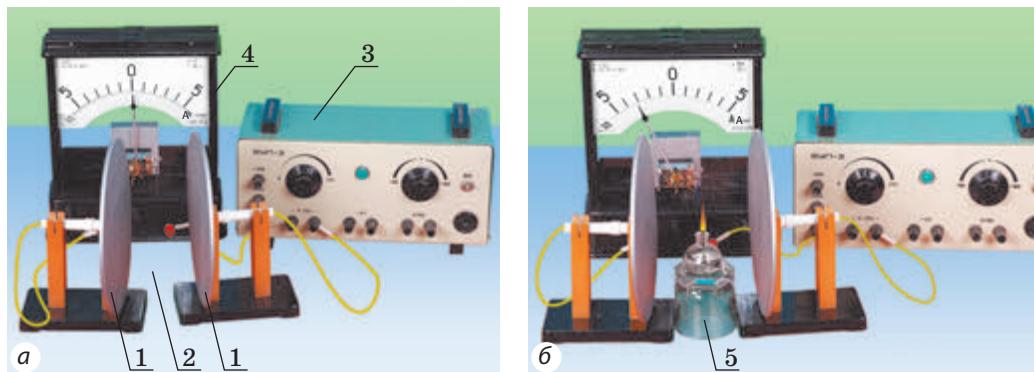
Складемо електричне коло з *потужного джерела струму*, гальванометра та двох металевих пластин, розділених повітряним проміжком. Замкнувши коло, побачимо, що стрілка гальванометра не відхиляється (рис. 39.1, *a*). А це означає, що в колі немає електричного струму або струм такий слабкий, що навіть чутливий 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 атомів і молекул і за звичайних умов майже не містять вільних носіїв струму. Тому за звичайних умов повітря є ізолятором.

Полум'я спиртівки нагріває повітря, її кінетична енергія теплового руху атомів і молекул повітря збільшується настільки, що в разі їх зіткнення від молекули або атома може відрватися електрон і стати вільним. Втративши електрон, молекула (або атом) стає позитивним іоном (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 (*a*); у разі внесення в повітряний проміжок запаленої спиртівки повітря стає провідником (*b*)

Здійснюючи тепловий рух, електрон може зіткнутися з нейтральною частинкою і «прилипнути» до неї — утвориться негативний йон (рис. 39.3).

Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів з 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 просторі 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, вільні електрони притягуються до позитивного електрода (анода) і поглинаються ним; негативні йони, досягши анода, «віддають»

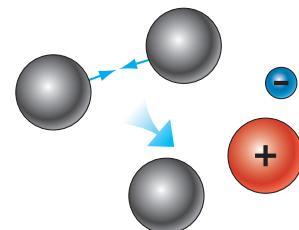


Рис. 39.2. Схема йонізації молекули газу. Втративши в результаті зіткнення електрон, молекула стає позитивним іоном

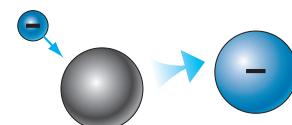


Рис. 39.3. Схема утворення негативних іонів у газі: електрон «прилипає» до нейтральної молекули

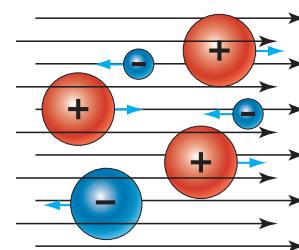


Рис. 39.4. За наявності електричного поля в йонізованому газі виникає напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм

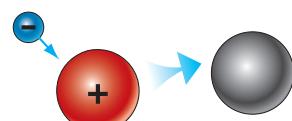


Рис. 39.5. Схема рекомбінації (відновлення) молекул газу

йому «зайві» електрони і перетворюються на нейтральні молекули (атоми); позитивні йони, досягши негативного електрода (катода), «забирають» у нього електрони і теж перетворюються на нейтральні частинки. Нейтральні молекули і 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 бути провідником.

#### 4

#### Дізнаємося про йонізацію електронним ударом

За певних умов газ може проводити електричний струм і після припинення дії йонізатора.

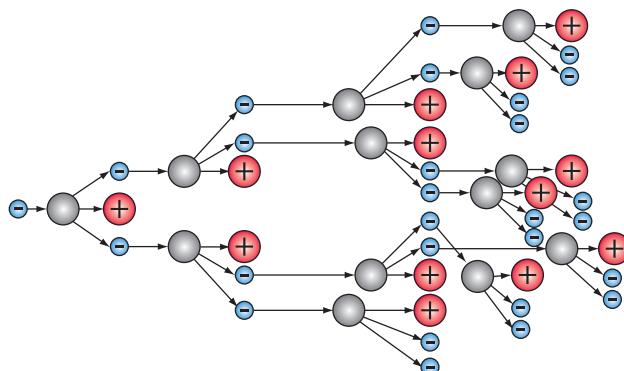
Газовий розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.

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 іон 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 з 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 з 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 довго розганятись або якщо він буде розганятися швидко.

За атмосферного тиску електрон дуже часто зазнає зіткнень, тому **електричне поле**, в якому він рухається, **має бути досить сильним**, щоб електрон зміг набути енергії, необхідної для йонізації.

Якщо ж тиск газу є дуже малим, тобто **газ є досить розрідженим**, то час між зіткненнями значно збільшується й електрон може набути енергії, необхідної для йонізації молекули, 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. Йонізацію 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 та емісії електронів з поверхні катода.

**Контрольні запитання**

- Чому за звичайних умов газ не проводить електричний струм?
- 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?
- 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**

- В електричному полі, створеному двома різномінено зарядженими пластинами (рис. 1), міститься йонізований газ. Перенесіть рисунок до зошита. Зобразіть лінії електричного поля між пластинами. Покажіть напрямок руху електронів, позитивних йонів, негативних йонів. Яким буде рух нейтральних частинок?

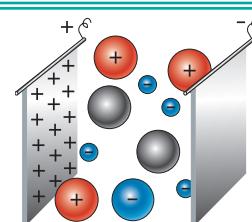


Рис. 1

- 2.** Чому в разі охолодження газів їхня провідність падає?
- 3.** Чим іонізація 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 іонізується 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. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, чому це відбувається, що є спільним між цим явищем і роботою сенсорного екрана, хто був винахідником плазмової кулі, та ін.
- 6.** Заповніть таблицю. У кожному стовпчику наведіть не менш ніж п'ять прикладів фізичних величин.



Рис. 2



#### 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 отримав завдяки новітній для свого часу технології зварювання під флюсом, яку розробив засновник і перший директор інституту академік Євген Оскарович Патон.

На фото — відомий суцільнозварний міст Патона в Києві. Цей міст Американське зварювальне товариство визнало видатною зварною конструкцією ХХ ст.

Президент НАНУ академік Борис Євгенович Патон, який зараз очолює інститут, гідно продовжив справу свого батька. Під його керівництвом розроблені не тільки традиційні засоби зварювання для промисловості, — новітні технології застосовують у космосі й навіть для зварювання живих тканин.



## § 40. ВІДИ САМОСТІЙНИХ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ

Яскраві (а іноді й небезпечні) явища: блискавка, полярне сяйво, моторошні для необізаної людини «вогні святого Ельма», різnobарвне 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 з цього параграфа.

### 1

#### Знайомимося з іскровим газовим розрядом

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.

Іскровий розряд має вигляд яскравих зиг'загоподібних 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 в області розряду різко підвищуються, в результаті повітря швидко розширяється і виникають звукові хвилі.

У техніці іскровий розряд використовують, наприклад, у запальних свічках бензинових двигунів (рис. 40.3), для обробки особливо міцних металів.

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 різноманітно зарядженими частинами, або напруга між хмарою і Землею сягає кількох сотень мільйонів вольтів.



**Рис. 40.1.** Іскровий розряд між зарядженими кондукторами електрофорної машини



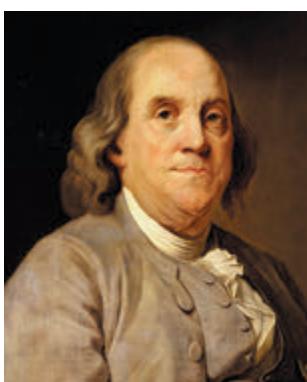
**Рис. 40.2.** Вигляд іскрового розряду



**Рис. 40.3.** Електрична напруга між електродами запальної свічки становить 12–15 тис. вольтів



**Рис. 40.4.** Михаїло 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 блискавко-відводу

Завдяки ударній йонізації, а далі — йонізації випромінюванням, яке супроводжує розряд, в електричному полі між хмарами з'являються лавини вільних іонів та електронів, тобто виникає короткочасний самостійний газовий розряд — блискавка. Сила струму в каналі блискавки сягає сотень тисяч амперів.

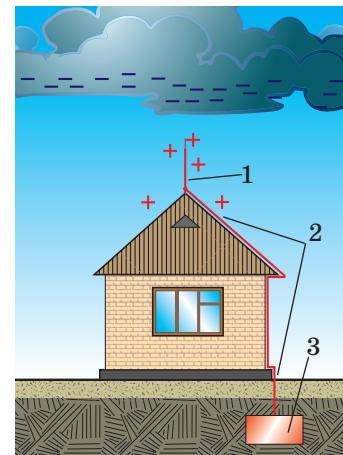
Електричні властивості блискавки першими почали вивчати незалежно один від одного російський учений М. В. Ломоносов (рис. 40.4) і американський дослідник Б. Франклін (рис. 40.5).

## Бережемося від удару блискавки

**2** 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 електропередач і навіть призвести до загибелі людей.

Щоб не стати жертвою удару блискавки, слід пам'ятати, що блискавка частіше вдаряє у відносно високі предмети, тому слід дотримуватися таких **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 вас в автомобілі, не виходьте з нього, зачиніть вікна і двері та перевекайте 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) (рис. 40.6).



**Рис. 40.6.** Трагічна загибель Георга Вільгельма Ріхмана 6 серпня 1753 р. (гравюра)

**Рис. 40.7.** «Вогні святого Ельма» — коронний розряд біля гострих кінців корабельних щогл — багато століть сповнювали жахом мореплавців, які не могли правильно пояснити їхню природу

**Рис. 40.8.** Блискавковідвід (громовідвід): 1 — загострений металевий стрижень; 2 — провідник — товстий з'єднувальний провід; 3 — металевий предмет, закопаний глибоко у землю

### 3

### Знайомимося з коронним газовим розрядом

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. 40.7). З'ясуємо, чому і як виникає коронний газовий розряд.

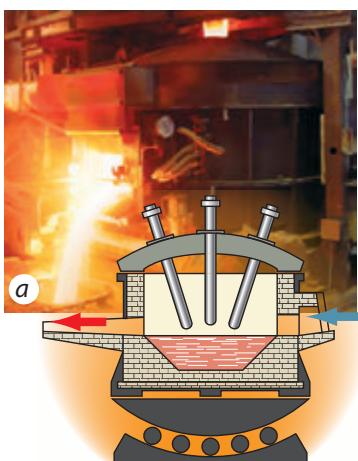
На поверхні Землі під дією електричного поля грозової хмари накопичуються (індукуються) заряди, за знаком протилежні заряду хмари. Особливо щільно такі заряди розташовані на гострих частинах предметів. У результаті електричне поле біля вістря виявляється настільки сильним, що заряд стікає із загостреного предмета, іонізуючи довколишнє повітря. Оскільки поле є досить сильним тільки навколо вістря, то коронні розряди спостерігаються лише біля гострих частин предметів.

На виникненні коронного розряду ґрунтуються дія **блискавковіводу**. Блискавковідвід являє собою загострений металевий стрижень, з'єднаний товстим провідником із металевим предметом (див. рис. 40.8). 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 блискавковіводу виникає коронний розряд. У результаті заряд не накопичується на будинку, а стікає з вістря блискавковіводу.

Вважається, що блискавковідвід винайшов Бенджамін Франклін у 1752 р. Проте подібні конструкції існували й раніше. Наприклад, щоб



**Рис. 40.9.** Дуговий газовий розряд



**Рис. 40.10.** Застосування дугового газового розряду для плавлення (а) та зварювання (б) металів

захиститися від блискавки, моряки Давньої Греції прив'язували до леза меча мотузку, меч прикріплювали до щогли, а кінець мотузки опускали в море.

#### 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. 40.9). 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 °C, і з поверхні катода починають «випаровуватись» електрони.

Тепер, навіть якщо електроди розвести, через газовий проміжок між ними проходить струм, оскільки в проміжку буде достатня кількість вільних заряджених частинок (вільні електрони, що «випарувалися» з катода, а також вільні електрони та іони, що з'явилися внаслідок іонізації газу через високу температуру). Надалі висока температура катода й анода підтримується бомбардуванням електродів позитивними і негативними іонами та електронами, прискореними електричним полем.

Висока температура іонізованого газу у випадку дугового розряду, а також випромінювання світла, що 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. 40.10).

**5****З'ясовуємо умови виникнення тліючого газового розряду**

За *низького тиску*, що становить десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа, можна спостерігати світіння розрідженого газу — **тліючий газовий розряд**. Річ у тім, що за такого низького тиску відстань між молекулами є настільки великою, що навіть у слабкому електричному полі електрони встигають за час між ударами набути кінетичної енергії, достатньої для ударної іонізації.

Тліючий розряд використовують у лампах денного світла (люмінесцентних трубках), у квантових джерелах світла — газових лазерах. Крім того, його застосовують у кольоворових газорозрядних трубках: колір світіння в разі тліючого розряду визначається природою газу, а отже, може бути різним.

**Підбиваємо підсумки**

Залежно від тиску й температури газу, способів його іонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири основні типи самостійних газових розрядів.

За атмосферного тиску й великої напруги між електродами виникає іскровий газовий розряд, який являє собою яскраві розглужені зигзагоподібні смужки. Прикладом гіантського іскрового розряду є блискавка. Удар блискавки може привести до загибелі, тому під час грози необхідно суворо дотримуватися правил безпеки.

Самостійний газовий розряд, що утворюється в сильному електричному полі біля гострих виступів предметів, називають коронним газовим розрядом.

За високої температури між електродами, роздеденими на невелику відстань, виникає газовий розряд, що супроводжується дуже яскравим світінням у формі дуги, — дуговий газовий розряд.

За низького тиску (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа) можна спостерігати світіння розрідженого газу внаслідок тліючого розряду.

**Контрольні запитання**

1. Перелічіть 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 II

### «Електричні явища. Електричний струм»

- 1.** У розділі II ви ознайомилися з новими фізичними величинами. Перша з них — *електричний заряд*.

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД —**

фізична величина, яка характеризує властивість частинок  
або тіл вступати в електромагнітну взаємодію

↓  
**Позитивний**

**Протон** — носій елементарного  
позитивного заряду  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл

↓  
**Негативний**

**Електрон** — носій елементарного  
негативного заряду  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  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 певну 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 тіл і частинок та діє з певною силою на інші тіла й частинки, які мають електричний заряд

- 4.** Ви вивчили основні закони електростатики.

**ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ**

↓

**Закон Кулона:**  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ , —  
якщо заряди нерухомі точкові

↓

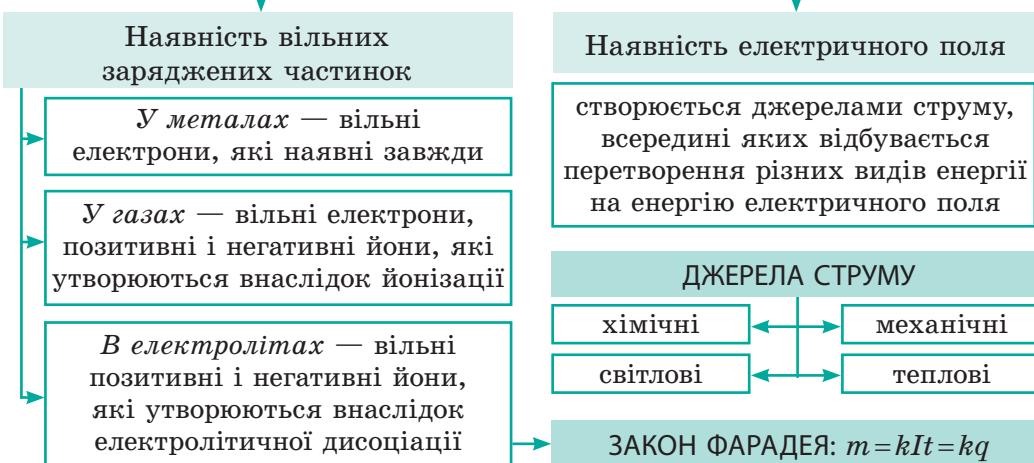
**Закон збереження електричного заряду:**  $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$ , —  
якщо система зарядів замкнена

- 5.** Ви довідалися про *електричний струм* і умови його існування.

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ —**

напрямлений рух частинок, які мають електричний заряд

## УМОВИ ІСНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ



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:**  $I = \frac{U}{R}$

7. Ви ознайомилися з різними видами з'єднання провідників.

Фізична величина	Вид з'єднання провідників	
	Послідовне	Паралельне
Сила струму	$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
Напруга	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$
Опір	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

8. Ви спостерігали дію електричного струму та дізналися, як визначити роботу і потужність струму; кількість теплоти.

Робота струму: $A = UIt$
Потужність струму: $P = UI$

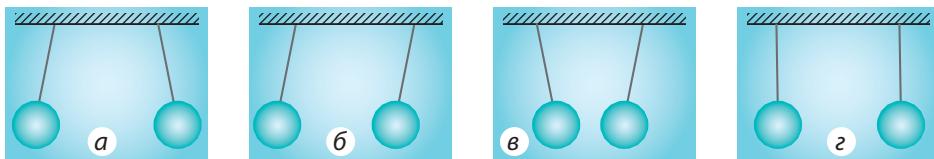
Кількість теплоти, що виділяється внаслідок проходження струму (закон Джоуля — Ленца): $Q = I^2Rt$
--

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ II

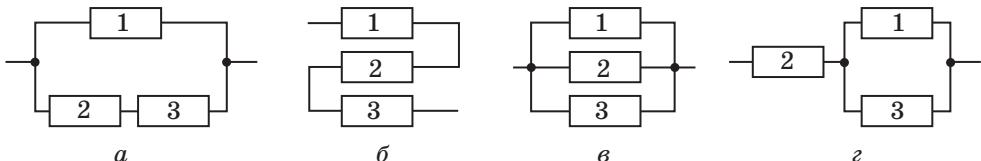
### «Електричні явища. Електричний струм»

#### Частина 1. Електричний заряд. Електричне поле. Електричний струм

- 1.** (1 бал) На рисунку зображенено чотири пари кульок, підвішених на шовкових нитках. На якому рисунку зображенено кульки, заряджені однайменними зарядами?



- 2.** (1 бал) На якому рисунку резистори 1 і 2 з'єднані послідовно?



- 3.** (1 бал) На рис. 1 зображенено лінії електричного поля, створеного двома зарядженими кульками. Яке твердження є істинним?
- Обидві кульки мають позитивний заряд.
  - Обидві кульки мають негативний заряд.
  - Кулька 1 заряджена негативно, кулька 2 — позитивно.
  - Модуль заряду кульки 1 більший за модуль заряду кульки 2.

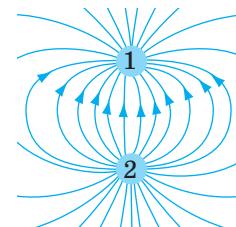


Рис. 1

- 4.** (1 бал) Установіть відповідність між елементом електричного кола та його позначенням на схемі.

1 Нагрівальний елемент	2 Лампа	3 Ключ	4 Гальванічний елемент
А —  —	Б —  —	В —  —	Г —  —

- 5.** (2 бали) Установіть відповідність між пристадом і фізичною величиною, яку ним вимірюють.

1 Амперметр	2 Вольтметр	3 Омметр	4 Динамометр
А Сила	Б Сила струму	В Опір	Г Густина

- 6.** (2 бали) На цоколі електричної лампи ліхтарика написано: «4,4 В; 0,22 А». Яким є опір нитки розжарення лампи під час світіння?
- 0,05 Ом;
  - 0,968 Ом;
  - 4,18 Ом;
  - 20 Ом.

- 7.** (2 бали) Яким є опір ніхромового дроту завдовжки 20 см і з площею поперечного перерізу  $2 \text{ mm}^2$ ?
- 0,11 Ом;
  - 11 Ом;
  - 22 Ом;
  - 44 Ом.

- 8.** (2 бали) Установіть відповідність між перетворенням енергії, що відбувається в технічному пристрой, та назвою пристроя.
- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1 Хімічна енергія перетворюється на електричну.   | A Фотоелемент   |
| 2 Електрична енергія перетворюється на механічну. | B Акумулятор    |
| 3 Електрична енергія перетворюється на теплову.   | C Електродвигун |
| 4 Світлова енергія перетворюється на електричну.  | D Нагрівач      |
| 5   | E Термопара     |
- 9.** (3 бали) За 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 їх значеннями в одиницях СІ.
- |                      |                         |                |
|----------------------|-------------------------|----------------|
| 1 Напруга на ділянці | 2 Сила струму в ділянці | 3 Опір ділянки |
| A 1,5                | B 14                    | C 21           |
| D 31,5               | E 21                    | F 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 їх взаємодії зменшилась у 16 разів?
- 12.** (3 бали) Резистори 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 опором 9 Ом кожний з'єднані паралельно і приєднані до джерела струму, напруга на затискачах якого 12 В. Якою є сила струму в колі?
- 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 змінятися покази приладів (рис. 3), якщо повзунок реостата перемістити ліворуч?

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп’ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

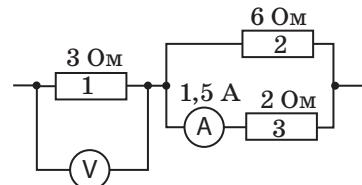


Рис. 2

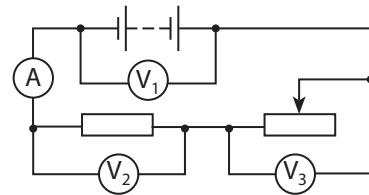


Рис. 3

## Частина 2. Робота і потужність електричного струму. Електричний струм у різних середовищах

У завданнях 1, 2 визначте правильне закінчення речення.

- (1 бал) У газах вільні заряджені частинки можуть з'явитися в результаті:
  - електролітичної дисоціації;
  - поляризації молекул газу;
  - дії зовнішнього йонізатора;
  - рекомбінації молекул газу.
- (1 бал) Очистку металів за допомогою електролізу називають:
  - галіваностегія;
  - галіванопластика;
  - електролітична дисоціація;
  - рафінування.
- (2 бали) Установіть відповідність між видом самостійного газового розряду, що лежить в основі дії технічного пристрою, та назвою пристрою:
 

1 Дуговий розряд	A Бліскавковідвід
2 Іскровий розряд	B Запальна свічка
3 Коронний розряд	C Газорозрядна лампа
4 Тліючий розряд	D Лампа розжарення
	E Зварювальний апарат
- (2 бали) На рис. 1 схематично зображені три дроти, що виготовлені з різних матеріалів і приєднані до джерела струму. Довжини дротів, а також площині їхніх поперечних перерізів однакові. У якому дроті виділяється найбільша кількість теплоти?

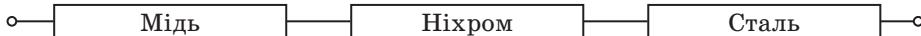


Рис. 1

- a) у сталевому; б) мідному; в) ніхромовому; г) у дротах виділяється однакова кількість теплоти.
- (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?
  - 0,12 Дж;
  - 0,74 Дж;
  - 3,6 Дж;
  - 12 Дж.
- (2 бали) Сила струму в нагрівальному елементі електричної прачки становить 5 А, опір елемента — 40 Ом. Яка кількість теплоти виділяється в нагрівальному елементі за 5 хв?
  - 2 Дж;
  - 200 Дж;
  - 300 кДж;
  - 5 кДж.
- (2 бали) Якою є сила струму в нитці розжарення електричної лампи (рис. 2) під час світіння?
  - блізько 0,45 А;
  - 2,2 А;
  - 22 кА;
  - визначити неможливо.

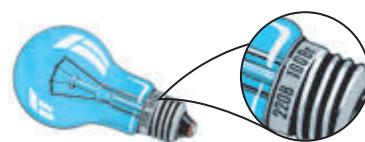


Рис. 2

- 8.** (2 бали) Під час сріблення виробу за 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 за 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.

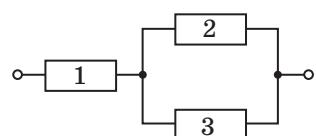


Рис. 3

- 10.** (3 бали) Резистори, що мають опори 3 і 6 Ом, з'єднані паралельно й підключенні до джерела струму, напруга на затискачах якого дорівнює 12 В. Визначте потужність електричного струму в кожному резисторі й на всій ділянці.

- 11.** (4 бали) Транспортер піднімає вантаж масою 300 кг на висоту 16 м за 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 через 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 підключенні до батареї гальванічних елементів. Напруга на затискачах батареї становить 12 В, опір кожного резистора дорівнює 6 Ом. Визначте потужність, яку споживає кожний резистор.

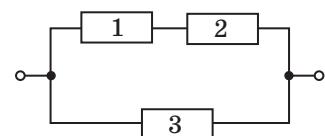


Рис. 4

- 14.** (4 бали) Нікелювання металевої пластиини здійснювалося за сили струму 0,89 А й тривало 1 год 36 хв. Визначте товщину шару нікелю, що вкрив пластиину, якщо площа поверхні пластиини становить  $96 \text{ см}^2$ .

Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаній результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

## 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 надчутивий електроскоп і зайшов з ним до клітки. Ззовні асистенти створювали потужні електричні розряди, але електроскоп не зареєстрував наявність електричного заряду в клітці. Пристрій одержав назву *клітка Фарадея* і зараз використовується для захисту від дії електромагнітних полів.

Кліткою Фарадея «навпаки» користується більшість із нас, розігриваючи 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 важомий 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 всередині 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

## Енциклопедична сторінка

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, уведено стрічку (2) транспортера, яка перебуває в постійному 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).

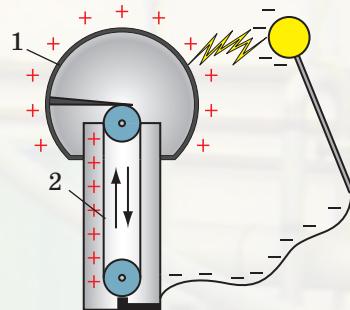


Рис. 3

А чи може лейденська банка стати в пригоді в повсякденному житті? Виявляється, що 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 задовільняє генератор, а для живлення ламп на паркінгу досить і маленької батарейки. Навіщо ж возити зайві кілограмми? 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 запуску двигуна. Порівняйте розміри й вагу суперконденсатора та автомобільного акумулятора. Погодьтеся, різниця вражає!



Рис. 4



Рис. 5

## Орієнтовні теми проектів

1. Електрика в житті людини.
2. Сучасні побутові та промислові електричні пристрой.
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. Із 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 пристройів.
6. Застосування електрики в медицині.
7. Дія електричного струму на клітини рослин та інших живих істот.
8. Історія електричної лампи.
9. Азбука Морзе та електричний телеграф.
10. Основні правила монтажу освітлювальної та силової мереж.
11. Надпровідність: історія відкриття та перспективи застосування.
12. Історія електролізу.
13. Внесок українських учених у розвиток електрозварювання.
14. Як працює сенсорний екран.
15. Електричний струм у напівпровідниках.
16. Як був винайдений громовідвід.

## Теми експериментальних досліджень

1. Створення електроскопа та дослідження електростатичних явищ.
2. Цікаві досліди з електростатики.
3. Візуалізація силових ліній електричного поля за допомогою солом'яніх «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 проектом, рефератом, проведеннем експериментального дослідження уважно ознайомтеся з порадами на с. 227–228 підручника.*

## ЕТАПИ РОБОТИ НАД НАВЧАЛЬНИМ ПРОЕКТОМ

**1. Організаційний етап.** Вибір теми навчального проекту, обговорення мети та завдань проекту, складання плану реалізації проекту.

**План проекту** — це документ, який містить заздалегідь намічений порядок дій, необхідних для досягнення мети проекту.

План допомагає оцінити власні можливості та висвітлити проблеми, які можуть виникнути під час роботи.

На цьому етапі доцільно також визначити основні етапи роботи над проектом, способи роботи на кожному етапі, терміни роботи, обов'язки та відповідальність кожного учасника проекту.

**2. Підготовчий етап.** Пошук інформації, яка висвітлює тему навчального проекту, а також допомагає вирішенню завдань проекту.

У ході пошуку матеріалів до проекту потрібно одразу їх сортувати. Для цього часто використовують портфоліо.

**Портфоліо проекту** — це впорядкована добірка матеріалів, зібраних з певною метою.

**Електронне портфоліо проекту** — це збірка електронних матеріалів проекту, які впорядковано за певною структурою.

Електронне портфоліо дозволяє здійснювати швидкий пошук документів; його легко редагувати, доповнювати, переносити, зберігати і т. д.

Використовуючи додаткову літературу, інтернет-ресурси тощо, не забувайте зберігати посилання на кожне джерело інформації — записувати назву ресурсу, ім'я автора. Пам'ятайте про авторське право!

**3. Проектний етап.** Опрацювання зібраної інформації, створення моделей, формулювання висновків і пропозицій.

Для уточнення отриманої інформації та одержання додаткової можна звертатися до довідників, словників, а також до вчителя.

**4. Оформлювальний етап.** Оформлення результатів роботи над навчальним проектом, створення презентації для захисту проекту.

Щоб презентація проекту відбулася успішно, необхідно виділити час для її ретельної підготовки. Переконайтесь, що ви виконали всі завдання проекту. Підготуйте доповідь. Для доповіді вибирайте найголовніше, викладайте свої думки коротко, чітко, зрозуміло.

Якщо ви плануєте презентувати проект із комп'ютерною підтримкою, то заздалегідь напишіть план, у якому позначте послідовність слайдів. Орієнтовно це можна зробити так:

Зміст слайда	Зміст доповіді
Тема проекту, виконавці	Повідомлення теми проекту, представлення виконавців
Ключове питання	Повідомлення ключового питання, яке відображає тему та мету проекту
Матеріали проекту	Розповідь про дослідження
Висновки	Оголошення висновків
Список джерел	Презентація джерел, що були використані в ході роботи над проектом
Подяка	Подяка всім, хто допомагав у роботі над проектом. Подяка всім присутнім за увагу, побажання успіхів

**5. Презентаційний етап.** Демонстрація результатів навчального проекту, захист ідеї проекту та отриманих результатів.

**6. Підсумковий етап.** Аналіз виконання завдань навчального проекту, визначення результатів проекту: яку користь приніс або може принести проект.

#### **Загальні правила презентації проекту**

1. Доповідати треба з гарним настроєм. Не забувайте про свій зовнішній вигляд, слідкуйте за поставою.
2. Під час доповіді дивіться на аудиторію.
3. Слова вимовляйте голосно та чітко.
4. Чітко назвіть себе, тему виступу та проблему, над якою ви працювали.
5. Не читайте доповідь з аркуша, а лише звіряйтесь з нотатками, щоб нічого не пропустити.
6. Стежте за часом виступу. Він не повинен перевищувати регламент.

**Регламент — це час, який відведено на виступ. Про свій регламент слід дізнатися заздалегідь, ще в ході підготовки до виступу.**

7. Будьте готові відповідати на запитання. Відповідь на будь-яке запитання бажано починати з подяки тому, хто його поставив.
8. Після завершення доповіді та відповідей на запитання подякуйте всім присутнім за увагу.

## 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	Вуглевислий газ	830	Кисень	920
Водяна пара	2200	Гелій	5210	Повітря	1000

**Таблиця 2.** Температура  $t$  плавлення і кристалізації деяких речовин (за нормальногого атмосферного тиску)

Речовина	$t, {}^\circ\text{C}$	Речовина	$t, {}^\circ\text{C}$	Речовина	$t, {}^\circ\text{C}$
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

## ДОДАТОК

**Таблиця 3.** Питома теплота плавлення  $\lambda$  деяких речовин\*

Речовина	$\lambda$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$\lambda$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$\lambda$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
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  $t_{\text{кип}}$  деяких речовин\*

Речовина	$t_{\text{кип}}$ , °C	Речовина	$t_{\text{кип}}$ , °C	Речовина	$t_{\text{кип}}$ , °C
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	$r$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$r$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$r$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
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	$q$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Паливо	$q$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Паливо	$q$ , $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
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  $\rho$  деяких речовин  
(за температури 20 °C)

Речовина	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Речовина	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Речовина	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
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	Слюдя	$10^{17} - 10^{21}$

**Таблиця 8.** Електрохімічні еквіваленти  $k, \frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$

Алюміній ( $\text{Al}^{3+}$ )	0,09	Мідь ( $\text{Cu}^+$ )	0,66	Срібло ( $\text{Ag}^+$ )	1,12
Водень ( $\text{H}^+$ )	0,01	Мідь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	0,33	Хлор ( $\text{Cl}^-$ )	0,37
Залізо ( $\text{Fe}^{3+}$ )	0,19	Натрій ( $\text{Na}^+$ )	0,24	Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0,18
Кисень ( $\text{O}^{2-}$ )	0,08	Нікель ( $\text{Ni}^{2+}$ )	0,30	Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	0,34

**Таблиця 9.** Густина  $\rho$  деяких речовин (за температурі 15–20 °C)  
Речовини у твердому стані

Речовина	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	Речовина	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$
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

## ДОДАТОК

Закінчення таблиці 9

## Речовини в рідкому стані

Речовина	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Речовина	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
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 вишої 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  $\Delta$  (дельта), поряд наводять символ вимірюваної фізичної величини. Наприклад, запис  $\Delta V = 2 \text{ см}^3$  означає, що абсолютна похибка результату вимірювання об'єму становить  $2 \text{ см}^3$ .

**Відносна похибка результату вимірювання** дорівнює відношенню абсолютної похибки до вимірюваного значення фізичної величини.

Відносну похибку позначають символом  $\varepsilon$  (епсилон) і найчастіше подають у відсотках. Наприклад, під час вимірювання довжини олівця учнівською лінійкою 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 І ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

### Розділ I «Теплові явища»

#### Частина 1. Температура. Внутрішня енергія. Теплопередача

**№ 1.** 2. Рідина. 3. Інакше термометр змінить температуру тіла. 5. а) 1 °C, 22 °C; б) 5 °C, 15 °C.

**№ 2.** 1. а, б. 2. Збільшиться; збільшиться відстань між атомами і молекулами. 3. Об'єм збільшився, маса не змінилась, густина зменшилась, середня швидкість руху атомів збільшилась. 4. За температури нижче 0 °C вода перетвориться на лід, а за температури від 0 до 4 °C стовпчик термометра опускатиметься. 5. Зі зміною температури змінюються розміри деталей приладу, тому точність приладу зменшується. 6. Склянка може тріснути; внутрішні шари скла розширяться сильніше, ніж зовнішні. 7. Потенціальна → кінетична → енергія теплового руху атомів і молекул.

**№ 3.** 1. Ні. 2. Внутрішня енергія не змінюється, кінетична енергія зменшується, потенціальна збільшується. 3. Заходите в будинок — внутрішня енергія збільшується, механічна не змінюється; піднімаєтесь — внутрішня енергія не змінюється, механічна (потенціальна) збільшується; прискорюєте рух — внутрішня енергія не змінюється, механічна (кінетична) збільшується. 4. Внутрішня енергія збільшилась, механічна (потенціальна) зменшилась. 5. 1–Д, 2–А, 3–Г, 4–В.

**№ 4.** 1. Маємо 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 зберігає тепло. 2. Повітря, що міститься 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 нашої руки або передають їй тепло. Тому за температури, яка нижча від нашої власної, метали будуть здаватися більш холодними, ніж дерево, а за температури, яка вища за нашу власну, — більш нагрітими. За температури, яка дорівнює нашій власній, і металеві, і дерев'яні предмети будуть здаватися нагрітими однаково. 6. Під час збільшення температури куля буде підніматися, під час зменшення — опускатися.

**№ 6.** 1. Температура язиків полум'я більша за температуру навколошнього повітря. 2. Вода погано проводить тепло, а конвекція відсутня. 3. Щоб нагріти — над нагрівником, щоб охолодити — під льодом. 4. Хмари «тримаються» конвекційними потоками повітря.

**№ 7.** 1. Тіла з темною поверхнею краще випромінюють тепло. 2. У білій або сріблястій. 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; ступінь нагрітості залежить, зокрема, від кольору поверхні. 7. Маса,  $m$ , кг; температура,  $t$ , °C; густина,  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; кількість теплоти,  $Q$ , Дж.

**№ 8.** 1. Щоб нагріти 1 кг срібла на 1 °C, слід передати йому 250 Дж теплоти. 2. Вода має найбільшу теплоємність, тому, охолоджуючись, вона віддає навколошньому середовищу значну кількість теплоти. 3. 1,2 кДж. 4. Зі сталі. 5. Не залежить ані від маси, ані від зміни температури, ані від кількості переданої теплоти. 6. 540,8 кДж. 7. 10,5 м.

**№ 9.** 1. 16 л. 2. 70 °C. 3. 130 °C. 4.  $250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

#### Частина 2. Зміна агрегатного стану речовини. Теплові двигуни

**№ 10.** 1. в. 2. Молекули не змінились. Відстань між молекулами збільшилась. У воді молекули здебільшого коливалися біля положень рівноваги, час від часу переміщуючись

## Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки

рідиною. У парі молекули води почали рухатися ламаними траєкторіями, змінюючи напрямок свого руху під час зіткнень. **3.** Ні; газ займе весь наданий об'єм. **4.** Ні; над поверхнею є водяна пара. **5.** Ні; ми бачимо туман — дуже маленькі краплинки води. **7.** а, г.

**№ 11.** **1.** Вольфрам має високу температуру плавлення. **2.** А — твердому, В — рідкому, С — 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 маввищу температуру. **4.** Якщо температура навколошнього середовища менша від 0 °C — вода замерзатиме; більша за 0 °C — лід танутиме; 0 °C — 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 °C. **6.** Вища температуру плавлення має речовина 1; більшу питому теплоту плавлення — речовина 2; більшу теплоємність — речовина 2. **7.** 0,12. **8.** Так, зменшиться.

**№ 13.** **1.** У теплу; середня кінетична енергія молекул є більшою. **2.** Спирт швидше випаровується. **3.** Під час випарування вода поглинає енергію. **4.** Потові залози собаки розташовані лише на язиці, внаслідок випарування води тварина охолоджується. **5.** Ми бачимо туман: водяна пара, яку містить повітря, що ми видихаємо, конденсується. **6.** Сніг тане, отримана вода випаровується і конденсується в холодному повітрі.

**№ 14.** **1.** Зі збільшенням висоти зменшується атмосферний тиск, тому зменшується температура кипіння води. **2.** Внутрішня енергія 1 кг водяної пари за температури 100 °C 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 °C, частина води перетвориться на пару. **6.** Частина енергії витрачається на випарування. **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.** 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, й температура збільшуються. **4.** Пара виконала роботу, тому її внутрішня енергія, а отже, й температура зменшуються.

### Завдання для самоперевірки до розділу I

#### Частина 1

Номер завдання	1	2	3	4	5	7	9
Відповідь	г	б	б	а	а	в	а, б

**6.** Темний одяг краще поглинає сонячне випромінювання. **8.** І ватяний халат, і шуба погано проводять тепло, адже між ворсиками міститься багато повітря; мешканець Півночі не віддає багато тепла навколошньому середовищу, а мешканець пустелі — не отримує. **10.** 369 кДж. **11.** 5,1 кДж. **12.** На 600 °C. **13.** На 50,4 °C. **14.** 43,75 м. **15.** 5 °C.

#### Частина 2

Номер завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	г	г	в	а	б	в	г	в	1-В, 2-А, 3-Б	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, й температура збільшуються; під час робочого ходу газ, розширюючись, виконує роботу, тому його внутрішня енергія зменшується. **13.** 75 %. **14.** 8,94 кДж. **15.** 250 °C. **16.** 1,95 г. **17.** 40,3 кВт, 1 кН.

## Розділ II «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 на негативно, якщо притягнеться — заряджена позитивно. 3. 10 електронів. 4.  $6,25 \cdot 10^{18}$  електронів. 6. Сила тяжіння;  $F_{\text{тяж}} = 50 \text{ Н}$ ; вертикально вниз.

**№ 20.** 1. Між пластинами 3 і 4; пластини 1 і 3 заряджені позитивно, 2 і 4 — негативно. 2. 1) Починаються в нескінченості, 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.  $q_1 = q_2 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . 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. Збільшиться в 4 рази. 3. Збільшилась 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. Матеріал 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 розширяється. 5. 18 кг.

**№ 25.** 1. а) Електрична енергія  $\rightarrow$  хімічна енергія; б) хімічна енергія  $\rightarrow$  електрична енергія. 2. З'єднати один електроскоп з негативним полюсом джерела струму, другий — з позитивним. 3. Механічна енергія  $\rightarrow$  електрична енергія. 4. Елемент не буде працювати. 6.  $\approx 84,8$  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. 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 залежить.

**№ 29.** 1. 15 Ом. 2.  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 2,5 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 8 \text{ Ом}$ . 3. 225 В. 5. 60 Ом. 6. 0,25 А. 7. Не залежить. 8. 28 г.

**№ 30.** 1. 1 — з міді, 2 — із заліза, 3 — зі свинцю. 2. 5 мОм. 3. Опір зменшиться; сила струму збільшиться. 4. 2 м. 5. Зменшився 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  $\rightarrow$  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. Усрібному. 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; 399 грн 46 к. 3. 7,2 кДж. 4. а) 300 кДж, 120 кДж; б) 24,5 кДж, ≈61,2 кДж. 5. 12,5 А. 6. Під час паралельного з'єднання; в 4 рази. 8. 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.  $Q_m/Q_{cb} = 9,5$ .

**№ 35.** 1. 1,32 кВт. 2. У місцях з'єднання найбільший опір, тому (відповідно до закону Джоуля — Ленца) виділяється найбільша кількість теплоти. 3. Речовина має бути легкоплавкою. 4. Площа поперечного перерізу дроту в освітлюваному шнурі є малою (шнур розрахований на невелику силу струму), тому опір досить великий. Під час проходження струму силою 100 А в шнурі виділиться величезна теплота. 6. а, в.

**№ 36.** 1. У напрямку, протилежному напрямку силових ліній поля. 2. а. 3. Зі зменшенням площини поперечного перерізу збільшується опір і (відповідно до закону 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 · 10<sup>-19</sup> Кл; б) -1,6 · 10<sup>-19</sup> Кл.

**№ 37.** 2. У звичайній воді багато домішок, які розпадаються на іони. 3. Сіль має іонну 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  $\text{AgNO}_3$ , два електроди, амперметр, батарея акумуляторів, ключ, з'єднувальні проводи; 2) праворуч — анод, ліворуч — катод; 3) на катоді; 4) 1,4 А; 5) 26 хв 47 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. Лінії поля починаються на позитивно заряджений пластині, закінчується на негативно заряджений; негативні іони та електрони рухаються до позитивно зарядженої пластини, позитивні іони — до негативно зарядженої; нейтральні частинки рухаються хаотично. 2. Рекомбінація буде відбуватися частіше, іонізація — рідше. 3. Електролітична дисоціація не супроводжується виникненням вільних електронів, для її протікання не потрібен іонізатор; речовина розпадається на іони різних елементів. 4. Електричний струм у металах не супроводжується хімічними реакціями; носіями заряду є вільні електрони, а не іони.

**Завдання для самоперевірки до розділу II****Частина 1**

Номер завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Відповідь	а	б	в	1-В, 2-А, 3-Д, 4-Г	1-Б, 2-Д, 3-В, 4-А	г	а	1-Б, 2-В, 3-Г, 4-А	1-В, 2-А, 3-Б

10. Заземлити незаряджену кульку та наблизити її до зарядженої. 11. Збільшилась 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;  $V_2$  — збільшиться;  $V_3$  — зменшиться; показ амперметра А збільшиться.

**Частина 2**

Номер завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Відповідь	в	г	1-Д, 2-Б, 3-А, 4-В	в	г	в	а	в	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.

# АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

- A**
  - Агрегатний стан 44
  - Ампер 142
  - Амперметр 143
  - Анод 132
  
- B**
  - Бриз 27
  
- V**
  - Випаровування 60
  - Випромінювання 31
  - Вольт 146
  - Вольтметр 147
  
- Г**
  - Газовий розряд 209
    - несамостійний 209
    - самостійний 210
    - — дуговий 216
    - — іскровий 213
    - — коронний 215
    - — тліючий 216
  - Гальванічний елемент 132
  - Гальванометр 132
  - Гальванопластика 205
  - Гальваностегія 205
  
- Д**
  - Двигун внутрішнього згоряння 83
  - Джерела електричного струму 131
  - Диполь електричний 199
  - Діелектрики 125
  
- Е**
  - Електризація 103
    - тертям 112
    - через вплив (електростатична індукція) 115
  - Електрична схема 137
  - Електричне коло 136
  - Електричне поле 107
  - Електричний струм 124
  - Електроліз 201
  - Електроліти 200
  - Електролітична дисоціація 199
  - Електролічильник 179
  - Електромагніт взаємодія 102
  - Електрометр 117
  - Електроскоп 116
  - 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
    - точковий 119
  
- З'єднання провідників**
  - мішане 174
  - паралельне 170
  - послідовне 162
  
- Й**
  - Йонізація 209
  
- К**
  - Катод 132
  - Кипіння 67
  - Кількість теплоти 19
  - Коефіцієнт корисної дії
    - нагрівника 76
    - теплового двигуна 80
  - Конвекція 26
  - Конденсація 63
  - Кристалізація 52
  - Кулон 143
  
- Н**
  - Надпровідність 196
  - Наноматеріали 48
  - Напруга електрична 146
  
- О**
  - Ом 151
  - Опір електричний 151
  
- П**
  - Паливо 73
  - Пароутворення 60
  - Питома теплоємність 34
  - Питома теплота згоряння палива 74
  - Питома теплота пароутворення 68
  - Питома теплота плавлення 56
  - Питомий опір 155
  - Плавлення 51
  - Поляризація 115
  - Потужність електричного струму 181
  - Провідники 125
  
- Р**
  - Рафінування 204
  - Реостат 126
  - Рівняння теплового балансу 37
  - Робота електричного струму 180
  
- С**
  - Сила
    - електрична 107
    - Кулона 121
    - струму 141
  - Силові лінії електричного поля 109
  
- Т**
  - Температура 7, 8
  - Теплова рівновага 7
  - Теплове розширення 12
  - Тепловий двигун 79
  - Теплопередача 19
  - Теплопровідність 23
  - Термометр 8
  - 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. Наноматеріали . . . . .	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
<b>Частина 2. Робота і потужність електричного струму. Електричний струм у різних середовищах</b>	
§ 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 . . . . .	234
Орієнтовні теми проектів. Теми рефератів і повідомлень.	
Теми експериментальних досліджень . . . . .	226
Етапи роботи над навчальним проектом . . . . .	227
Додаток . . . . .	229
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 і завдань для самоперевірки . . . . .	233
Алфавітний покажчик . . . . .	237

## Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчаль- ний рік	Стан підручника	
			на початку року	в кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

**Інтернет-підтримка**

Для користування  
електронними матеріалами  
до підручника увійдіть на сайт  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)


**Служба технічної підтримки:**

тел.: (057) 719-48-65, (098) 037-54-68  
(понеділок–п'ятниця з 10:00 до 18:00)  
E-mail: [interactive@ranok.com.ua](mailto:interactive@ranok.com.ua)

**Навчальне видання**

**БАР'ЯХТАР Віктор Григорович, БОЖИНОВА Фаїна Яківна,  
ДОВГИЙ Станіслав Олексійович, КІРЮХІНА Олена Олександрівна**

**«ФІЗИКА»**

**підручник для 8 класу загальноосвітніх навчальних закладів**  
За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

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

Редактор *I. L. Moreva*. Технічний редактор *O. B. Smiyan*. Коректор *H. O. Krasna*

Підписано до друку 17.06.2016. Формат 70x100/16.

Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.

Ум. друк. арк. 19,50. Обл.-вид. арк. 25,35.

Наклад 332 389 прим. Зам. № 4706-16

ТОВ Видавництво «Ранок».

Свідоцтво ДК № 3322 від 26.11.2008. 61071 Харків, вул. Кібальчича, 27, к. 135.

Адреса редакції: 61145 Харків, вул. Космічна, 21а, 7 поверх. E-mail: [office@ranok.com.ua](mailto:office@ranok.com.ua)

Тел. (057) 701-11-22, 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

**[www.ranok.com.ua](http://www.ranok.com.ua)**

Під час підготовки видання були використані фотоматеріали із сайтів:

[freepik.com](http://freepik.com); [freeimages.com](http://freeimages.com); [morguefile.com](http://morguefile.com); [freebiefoto.com](http://freebiefoto.com);

[uk.wikipedia.org](http://uk.wikipedia.org); [pixabay.com](http://pixabay.com); [stocksnap.com](http://stocksnap.com)

Надруковано у друкарні ТОВ «Тріада Принт»

м. Харків, вул. Киргизька, 19. Тел. (057) 703-12-21. E-mail: [sale@triada.kharkov.ua](mailto:sale@triada.kharkov.ua)